

# TIERAKENTEEN RASITTUMINEN YLI 76 TONNIN HCT-YHDISTELMIEN KOEKUORMITUKSISSA VUONNA 2018





Nuutti Vuorimies, Altti Kurki, Pauli Kolisoja,  
Petri Varin, Timo Saarenketo

# **Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuonna 2018**

Väyläviraston tutkimuksia 17/2019

*Kannen kuva: Nuutti Vuorimies*

Verkkojulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0982  
ISBN 978-952-317-735-2

Väylävirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. 0295 34 3000

**Nuutti Vuorimies, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin ja Timo Saarenketo: Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuonna 2018.** Väylävirasto. Helsinki 2019. Väyläviraston tutkimuksia 17/2019. 102 sivua ja 2 liitettä. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-735-2.

**Avainsanat:** raskaat ajoneuvot, tierakenteet, monitorointi, urautumat, kosteus

## Tiivistelmä

Tässä raportissa esitetään tulokset vuonna 2018 tehdyistä tutkimuksista raskaiden ajoneuvojen kuormitusvaikutuksista tierakenteisiin. Se on jatkoa vuosien 2015-2017 tutkimuksista tehdyille raporteille. Erityisenä tarkastelun kohteena oli peräkkäisten akselien kuormitusvaikutuksesta mobilisoituvat kumulatiiviset muodonmuutokset ja mahdollinen tierakenteeseen suuntautuva veden pumppautuminen, kun tie sijaitsee pehmeällä pohjamaalla. Tutkimuksen mittauskohteet valikoituivat vuosien 2015-2017 tutkimusten koekohteiden pohjalta. Koekohteiden muodonmuutoksia havainnoitiin tierakenteeseen asennetuilla päällysteen alapinnan siirtymäantureilla ja RDSV-mittausauton laserkeilaimella mitatuilla urasyvyyksillä. Kuormitusajoneuvojen pysymistä tarkoitettulla ajouralla antureiden kohdalla seurattiin etäisyyslaserilla. Kosteuden muutoksia ei havaittu kuormituspäivinä koekohteissa käytetyillä mittausmenetelmillä vuonna 2018.

Roudan sulettua keväällä 2018 kahdessa päällystetyssä koekohteessa oli tarkoituksena peräkkäisinä mittauspäivinä vertailla yhden noin 64 tonnin 7-akselisen ajoneuvon aiheuttamia vasteita mittauskohteessa kahden peräkkäin ajaneen noin 64 tonnin 7-akselisen ajoneuvon aiheuttamiin vasteisiin, kun samassa ajassa mittauskohteen yli kulkenut kokonaisuudessa oli yhtä suuri. Lisäksi kuormitusajoneuvojen ajolinjoja hallitusti vaihtamalla pyrittiin pienentämään muodostunutta uraa tai estämään uran kasvu. Kyyjärven koekohteessa tutkittiin yhtenä päivänä myös perävaunuun asennetun erikoistelin kuormitusvaikutusta tierakenteeseen. Syksyllä 2018 vastaavanlaiset vertailukuormitukset uusittiin yhdellä päällystetyllä ja yhdellä soratiekoekohteella. Koekohteilla vertailukuormitukset tehtiin kahtena päivänä, jolloin ensimmäisenä aamupäivänä ajettiin toisella ajoneuvoyhdistelmällä ja iltapäivänä toisella yhdistelmällä sekä seuraavana päivänä vastaavat kuormitukset päivävastaisessa järjestyksessä.

Simon (Mt924) ohutpäällysteisellä kohteella hiekkaisella pohjamaalla sijainnut tierakenne kesti keväällä 2018 kuormitukset hyvin ja uran muodostuminen oli hyvin pientä raskaan liikenteen tiivistämällä koekohteella. Mitattavaa eroa urasyvyydessä yhden 7-akselisen ja kahden peräkkäin ajaneen 7-akselisen rekan välillä ei havaittu. Keväällä 2018 Kyyjärven (Mt 16863) mittauskohteella, joka oli heikkorakenteisin päällystetyistä mittauskohteista ja jonka päällysteen paksuus oli vain noin 30 mm, muodonmuutokset olivat selvästi suuremmat kuin Karstulan ja Simon kohteilla. Roudan sulamisen jälkeen puutteellisesti tiivistyneen Kyyjärven koekohteen lähtöolosuhteet eivät kuitenkaan olleet tasavertaiset eri päivinä ajatettujen kuormitusyhdistelmien välisen luotettavan vertailun tekemiseksi.

Kyyjärvellä syksyllä 2018 kahtena peräkkäisenä päivänä tehtyjen kuormituskokeiden perusteella heikolla pohjamaalla sijaitsevalla tiellä 14-akselinen yhdistelmä aiheutti urasyvyyden kasvua ja yksittäinen 7-akselinen yhdistelmä ennemminkin pienensi urasyvyyttä tai urasyvyys pysyi samana, kun kuormittava massa oli samassa ajassa yhtä suuri kummassakin tapauksessa. Myös Ranuan soratiekohteella syksyllä 2018 14-akselinen yhdistelmä aiheutti enemmän urasyvyyden kasvua kuin yksittäinen 7-akselinen yhdistelmä.

Kevään 2018 koekohteilla Kyyjärvellä ja Simossa raskaiden kuormitusajoneuvojen ajolinjan hallittu muuttaminen pienensi selkeästi muodostunutta uraa. Muutamilla kuormitusajoneuvojen ylityksillä aiemmin päivän aikana muodostunut urasyvyyden kasvu saatiin jopa palautettua kuormitusta edeltäneelle tasolle.

**Nuutti Vuorimies, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin och Timo Saarenketo: Belastning av vägkonstruktionen i provbelastningar med HCT-kombinationer på över 76 ton år 2018.** Trafikledsverket. Helsingfors 2019. Trafikledsverkets undersökningar 17/2018. 102 sidor och 2 bilagor. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-735-2.

## Sammanfattning

I denna rapport presenteras resultat från undersökningar gjorda 2018 av hur belastningen av tunga fordon påverkar vägkonstruktioner. Detta är en fortsättning på rapporten över undersökningarna från 2015-2017. Föremål för särskild granskning var de kumulativa formförändringar som mobiliseras av successiva axlars belastningspåverkan och eventuell pumpning av vatten i riktning mot vägkonstruktionen, när vägen ligger på mjuk undergrund. Mätställena för undersökningen valdes utifrån provobjekten 2015-2017. Formförändringar i provobjekten observerades via förskjutningsgivare i nedre ytan av vägkonstruktionens beläggning och via de spårdjup som en RDSV-mätbil mätte upp med laserskanner. Man följde upp hur belastningsfordonen hölls i avsett körspår med avståndslaser. Under belastningsdagarna observerades inga förändringar i fuktigheten med de mätmetoder som användes vid provobjekten 2018.

Efter tjällossningen våren 2018 ville man på två belagda provobjekt under på varandra följande mät dagar jämföra responsen från ett cirka 64 tons 7-axlat fordon på mätpunkten med responsen från två efter varandra körande cirka 64 tons 7-axlade fordon, när totalvikten som färdades över mätpunkten under samma tid var lika stor. Genom att kontrollerat ändra belastningsfordonens körlinjer försökte man minska spåruppkomsten eller förhindra att spåret blev större. Vid provobjektet i Kyyjärvi studerade man en dag även vilken belastningseffekt på vägkonstruktionen en specialboggi monterad på en släpvagn hade. Hösten 2018 upprepades motsvarande jämförande belastningar på ett belagt provobjekt och ett grusvägsprovobjekt. Vid provobjekten gjordes jämförande belastningar två dagar, varvid man på morgonen den första dagen körde med en fordonskombination och med en annan på eftermiddagen. Följande dag körde man med motsvarande belastningar i motsatt ordning.

Vägkonstruktionen vid mätpunkten i Simo (Lv 924) med tunn beläggning på sandig undergrund tålde belastningarna bra våren 2018 och spårbildningen var mycket ringa på det av den tunga trafiken packade provobjektet. Någon mätbar skillnad i spårdjupet mellan en 7-axlad och två efter varandra körande 7-axlade långtradare märktes inte. Vid mätpunkten Kyyjärvi (Lv 16863) våren 2018, som var den svagaste konstruktionen bland de belagda mätpunkterna och vars beläggningstjocklek var endast cirka 30 mm, var formförändringarna klart större än vid mätpunkterna i Karstula och Simo. Efter tjällossningen var utgångsförhållandena vid det bristfälligt packade provobjektet i Kyyjärvi ändå inte jämbördiga för att göra en tillförlitlig jämförelse mellan belastningskombinationer som kördes olika dagar.

Utifrån de belastningsprov som gjordes två på varandra följande dagar i Kyyjärvi hösten 2018 på en väg med svag undergrund ökade en 14-axlad kombination spårdjupet medan en enskild 7-axlad kombination snarare minskade spårdjupet eller så hölls det oförändrat, när den belastande massan i båda fallen var lika stor under samma tid. Även vid grusvägsobjektet i Ranua hösten 2018 ökade en 14-axlad kombination spårdjupet mera än en enskild 7-axlad kombination.

En kontrollerad ändring av de tunga belastningsfordonens körlinje minskade tydligt spårbildningen vid provobjekten i Kyyjärvi och Simo våren 2018. Det ökade spårdjup som hade uppkommit tidigare under dagen när belastningsfordon hade passerat några gånger återställdes till och med till samma nivå som före belastningen.

**Nuutti Vuorimies, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin and Timo Saarenketo: Strain on the road structure in stress tests for HCT combinations weighing more than 76 tonnes, 2018.** Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2019. Research reports of the Finnish Transport Infrastructure Agency 17/2019. 102 pages and 2 appendices. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-735-2.

## Abstract

This report presents the results of studies conducted in 2018 concerning strain on the road structure by heavy goods vehicles. It follows on from the report on studies conducted between 2015 and 2017. Special focus was on cumulative deformations caused by the load imposed by consecutive axles and the potential pumping effect forcing water into the road structure on roads built on soft soil. The measuring sites for the study were selected on the basis of the sites used for the studies in the years 2015 to 2017. Deformations at these sites were observed with displacement sensors installed on the lower surface of the pavement and rut depths measured with the laser scanner of an RDSV vehicle. A laser distance meter was used to monitor how well the vehicles used for the load test kept to the track specified on the road. No changes in moisture were detected with the measuring methods used at the test sites on load testing days in 2018.

At two paved test sites, the purpose was after the melting of the ground frost in spring 2018 to perform a test on two consecutive days to compare the response from one 7-axle vehicle of about 64 tonnes passing over the measuring point to the response from two 7-axle vehicles of about 64 tonne each passing over the measuring point one after the other, when the total mass passing over the measuring point over a given length of time was the same. Also, the aim was to reduce the rut created or to prevent the rut from deepening by controlled varying of the track taken by the test vehicles. At the Kyyjärvi test site, the load impact of a special bogie installed on a trailer on the road structure was also tested on one day. In autumn 2018, reference tests were conducted at one paved site and one gravel road site. The reference tests were conducted over two days: one articulated vehicle was driven in the first morning and another articulated vehicle in the first afternoon; on the next day, their order was reversed.

At the test site in Simo (road 924), with a thin pavement on sandy soil, the road structure withstood the loads well in the tests in spring 2018, and rut formation was slight, as heavy vehicle traffic had compacted the road. There was no measurable difference in rut depth caused by the passing of one 7-axle vehicle and two consecutive 7-axle vehicles. At the Kyyjärvi test site (road 16863) in spring 2018, where the pavement had the weakest structure among the test sites, with a pavement thickness of only about 30 mm, the deformations were far more pronounced than in Karstula or Simo. However, the initial conditions at the test site in Kyyjärvi after the melting of ground frost were not consistent from day to day because of imperfect road compacting, and a reliable comparison between the vehicles could not be made.

The load tests conducted in Kyyjärvi on two consecutive days in autumn 2018, on a road on soft soil, demonstrated that a 14-axle articulated vehicle increased rut depth but a single 7-axle articulated vehicle if anything reduced rut depth, or rut depth remained unchanged, when the load mass over a given length of time was the same in both cases. At the gravel road test site in Ranua in autumn 2018, the situation was the same: a 14-axle articulated vehicle caused a greater increase in rut depth than a single 7-axle articulated vehicle.

At the test sites in Kyyjärvi and Simo in spring 2018, controlled varying of the track taken by the test vehicles clearly reduced rut formation. Indeed, a few passes of the test vehicles in this manner caused the rut depth increase caused earlier in the day to almost return to the level prior to the test.

## Esipuhe

Tämä raportti kokoaa yhteen Liikenneviraston vuonna 2018 Roadscanners Oy:ltä ja Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksiköltä tilaamat tutkimukset HCT-yhdistelmien kuormitusvaikutuksista erilaisiin tierakenteisiin. Tutkimusten tavoitteena oli tuottaa taustatietoa raskaan ajoneuvokaluston säätelyä koskevien päätösten tekemiseen.

Raportin pääkirjoittajana on toiminut Nuutti Vuorimies. Lisäksi TTY:stä Altti Kurki osallistui mittauksien analysointiin ja raportin kirjoittamiseen. Roadscanners Oy:n osalta mittauksien analysoinnin ja raportoinnin on tehnyt pääosin Petri Varin. TTY:stä tutkimusten ohjaukseen on osallistunut Pauli Kolisoja ja Roadscanners Oy:stä Timo Saarenketo. Tutkimusten raportointien etenemistä ja tulosten analysointia ovat ohjanneet Kari Lehtonen ja Sami Petäjä nykyisestä Väylävirastosta.

TTY:ltä mittauslaitteiden asennuksiin ja mittauksiin osallistuivat myös Ville Liiv, Tero Porkka, Antti Kalliainen ja Ritva Kuisma sekä käyttöinsinööri Antti Akkanen. Roadscanners Oy:n Tampereen ja Rovaniemen toimistoista mittauksiin osallistui myös useita muita henkilöitä.

Vuonna 2018 Simon ja Ranuan koekohteita kuormitti Koneurakointi Tapani Koukkula Oy:n rekka-autot. Kyyjärven mittauskohteella kuormitusajoneuvona toimivat Kuljetus Villman Oy:n rekka-autot paitsi 24.5.2018 AT Wheels Oy:n toimittama rekka-auto. Lämpimät kiitokset manituissa yrityksissä mittauksien toteuttamisesta edesauttaneille henkilöille ja niihin osallistuneille kuljettajille.

Helsingissä marraskuussa 2019

Väylävirasto  
Tekniikka ja ympäristö



# Sisältö

1	JOHDANTO .....	9
1.1	Tutkimuksen tausta .....	9
1.2	Tutkimuksen tavoitteet .....	10
2	MITTAUSMENETELMÄT .....	11
2.1	Tierakenteesta tehtyt pistemäiset mittaukset .....	11
2.1.1	Dielektrisyys ja Percoaseman pitkäaikaiset seurantamittaukset ..	11
2.1.2	Huokosvedenpaine.....	11
2.1.3	Päällysteen tai kulutuskerroksen alapinnan pystysiirtymä .....	11
2.1.4	Kuormitusajoneuvon ajolinjan sijainti etäisyyslaserilla .....	11
2.1.5	Kiihtyvyyssanturit .....	12
2.1.6	Tiedonkeruu mittausantureista.....	13
2.2	Tien pinnalta tehtyt mittaukset.....	13
2.2.1	Rakennepaksuudet ja kosteus maatutkamittauksella .....	13
2.2.2	Urakasvu laserkeilauksella .....	13
2.3	Kuormitustavat ja kuormitusajoneuvot.....	14
3	MITTAUSKOhteET .....	16
3.1	Vuoden 2018 mittauskohteiden valintaperusteet.....	16
3.1.1	Kevään 2018 mittaukset.....	16
3.1.2	Syksyn 2018 mittaukset .....	16
3.2	Mittauskohteet ja niissä käytetyt mittausmenetelmät.....	17
3.2.1	Mt 16863 Kyyjärvi .....	17
3.2.2	Mt 924 Simo .....	18
3.2.3	Mt 18824 Ranua .....	19
4	MITTAUSTULOKSET .....	21
4.1	Mittaustulosten esittelyssä käytettyä terminologiaa .....	21
4.2	Mt 1683 Kyyjärvi – kevät ja syksy 2018 .....	22
4.2.1	Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet.....	22
4.2.2	Päällysteen alapinnan pystysiirtymät .....	22
4.2.3	Kiihtyvyyssantureiden perusteella määritetty ajolinjan sijainti ja päällysteen taipuma.....	45
4.2.4	Ajolinjan sijainti etäisyyslaserilla .....	48
4.2.5	Kosteuden muutokset maatutkamittauksella .....	54
4.2.6	Laserkeilauksella mitattu urautuminen .....	55
4.2.7	Urasyvyyden ja pystysiirtymäantureiden siirtymäeron muutokset.....	61
4.2.8	Yhteenveto Kyyjärven kohteen kuormituskokeista .....	64
4.3	Mt 924 Simo – kevät 2018 .....	65
4.3.1	Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet.....	65
4.3.2	Dielektrisyys- ja huokosvedenpaineen mittaukset .....	66
4.3.3	Päällysteen alapinnan pystysiirtymät .....	67
4.3.4	Kiihtyvyyssantureiden perusteella mitattu päällysteen taipuma ...	71
4.3.5	Ajolinjan sijainti etäisyyslaserilla .....	74
4.3.6	Kosteuden muutokset maatutkamittauksella .....	76
4.3.7	Urautuminen laserkeilauksella.....	77
4.3.8	Yhteenveto Simon kohteen kuormituskokeista .....	78
4.4	Mt 18824 Ranua – syksy 2018.....	78
4.4.1	Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet.....	78
4.4.2	Dielektrisyysarvojen mittaukset .....	79

---

4.4.3	Ajolinjan sijainti etäisyyslaserilla .....	80
4.4.4	Kosteuden muutos maatutkauksella.....	83
4.4.5	Urautuminen laserkeilauksella.....	84
4.4.6	Yhteenveto Ranuan kohteen kuormituskokeista.....	87
5	PÄÄTELMIÄ JA POHDINTOJA KUORMITUSKOKEIDEN TULOKSISTA.....	88
5.1	Pysyvät siirtymät ja urasyvyysien muutokset .....	88
5.1.1	Koekohteilla mitatut siirtymät.....	88
5.1.2	Pysyvä siirtymä ja urasyvyyden kasvu koekohdetta kuormittaneeseen massaansa nähden .....	92
5.1.3	Pysyvän siirtymän ja urasyvyyden muutoksen tarkastelu viimeisten ylitysten ollessa lähtökohta.....	93
5.1.4	Parannusehdotuksia ja huomioitavia asioita kuormitusajoneuvo- yhdistelmiä vertaileviin teiden koekuormituksiin .....	98
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	100
	LÄHTEET .....	102
	LIITTEET	
Liite 1	Kuormitusajoneuvojen tiedot	
Liite 2	Kyyjärven ja Simon koekohteiden kuormitussuunnitelmat keväällä 2018	
Liite 3	Mittauksissa käytettyjen antureiden sijainnit	
Liite 4	Koekohteilla teiden poikkileikkaukset	

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tässä raportissa esiteltävän tutkimuskokonaisuuden taustana on uusi raskaiden ajoneuvojen massoja ja mittoja säätelevä ajoneuvoasetus, joka astui voimaan lokakuussa 2013. Asetuksen myötä raskaan ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu kokonaismassa kasvoi 60 tonnista 76 tonniin. Asetusmuutos ei muuttanut yhden akselin sallittua akselimassaa, mutta kaksiakselisen telin enimmäismassa kasvoi 19 tonnista 21 tonniin ja kolmiakselisen telin enimmäismassa 24 tonnista 27 tonniin. Lisäksi tieverkollamme on tietyillä pitkämatkaisten kuljetusten reiteillä otettu erikoisluvilla käyttöön kokonaismassaltaan jopa yli 100 tonnin ajoneuvoyhdistelmiä.

Raskaiden ajoneuvojen kuormitusvaikutuksia on asetusmuutokseen liittyen selvitetty sekä paksupäällysteisen päätien että kevyemmin rakennetun ohutpäällysteisen tien olosuhteissa tehdyillä kenttämittauksilla ja näitä tukevilla mallinnustarkasteluilla (Kolisoja et al. 2015, Kalliainen et al. 2015). Seuraavissa tutkimuksissa keskityttiin tarkastelemaan raskaiden ajoneuvojen aiheuttamia rasituksia matalahkolla asennussyvyydellä sijaitseviin teräs- ja muovirumpuihin (Haakana et al. 2015) sekä teräsrumpujen korjausrakenteisiin (Kalliainen et al. 2016). Viimeisimpänä tutkimuskokonaisuutena on pyritty havainnollistamaan useamman peräkkäisen raskaan ajoneuvoakselin kuormitusvaikutuksen kumuloitumista rakennepaksuudeltaan ja pohjamaaolosuhteiltaan erilaisissa mitauskohteissa vuosina 2015–2017 (Vuorimies et al. 2018), jolloin keskeisimmäksi tutkimuskysymykseksi on voitu pelkistää, missä olosuhteissa ja kuinka paljon haitallisempaa tierakenteen kannalta on, jos tietty määrä rahtia kuljetetaan uuden ajoneuvoasetuksen mukaisella ajoneuvokalustolla verrattuna siihen, että sama tavaramäärä kuljetettaisiin aikaisemman ajoneuvoasetuksen mukaisella kalustolla.

Erityisesti heikon pohjamaan päällä olevilla ohuesti rakennetuilla teillä on olemassa merkittävä riski raskaimmista ajoneuvoista tiestölle aiheutuvien rasitusvaikutusten kasvamiselle. Yhtenä syynä tähän on se, että useamman peräkkäisen akselin muodostaman akseliryhmän kuormitusvaikutuksesta mobilisoituvat muodonmuutokset summautuvat pehmeässä pohjamaassa kasvattaen näin myös pohjamaan päällä olevaan tien päällysrakenteeseen kohdistuvia kokonaismuodonmuutoksia. Toisaalta aikaisempaa useampien peräkkäisten akseleiden kuormittamassa joustavan pohjamaan päällä olevassa tierakenteessa on suurempi mahdollisuus pohjamaasta tierakenteeseen suuntautuvalla veden pumppautumiselle. Tierakenteen vesipitoisuuden kasvaessa siihen voi pahimmillaan muodostua rakennekerrosmateriaalien lujuutta ja sen myötä kuormituskestävyyttä merkittävästi heikentävää huokosveden ylipainetta. Erityisesti näin voi käydä, jos tierakenne on huonosti kuivatettu ja sen materiaalit ovat runsaan hienoainespitoisuuden ja epäedullisen mineralogian vuoksi voimakkaasti vettä itseensä pidättäviä. Luonnollisesti myös roudan sulamisvaiheen kostuttamassa tierakenteessa edellytykset huokosveden ylipaineen kehittymiselle ovat normaalia kuivatustilannetta otollisemmat.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän vuonna 2018 kahdessa vaiheessa toteutetun tutkimuskokonaisuuden tavoitteena on ollut toteuttaa ohjelmoitu sarja kuormituskokeita, joiden avulla on pyritty täydentämään aiemman vuosina 2015-2017 toteutetun tutkimuksen koesarjojen havaintoja tai koesarjoissa havaittuja puutteita. Vuoden 2018 tutkimuksessa useamman peräkkäisen raskaan ajoneuvoakselin kuormitusvaikutuksen kumuloitumisen tutkiminen painottui tierakenteisiin, jotka olivat rakennepaksuudeltaan ohuimpia aiemman tutkimuksen mittauskohteista. Keskeisenä tavoitteena vuonna 2018 on ollut verrata 7-akselista yhdistelmää 14-akseliseen yhdistelmään, kun yhdistelmissä kulkee mittausalueen yli sama massa samassa ajassa. Toisena tavoitteena on ollut simuloida hallitusti raskaan ajoneuvo-yhdistelmän ajolinjan vaikutusta urautumiseen.

Keväällä 2018 mittaukset tehtiin kolmena peräkkäisenä päivänä sekä Kyyjärven (Mt 18824) että Simon (Mt924) kohteilla roudan sulamisen loppuvaiheessa. Kahtena ensimmäisenä päivänä toistettiin vuoden 2017 mittaukset, joissa tavoitteena oli ensisijaisesti verrata 7-akselista yhdistelmää 14-akseliseen yhdistelmään, kun yhdistelmissä kulkee mittausalueen yli sama massa samassa ajassa. Kolmantena päivän Kyyjärvellä mitattiin perävaunun viimeiseen teliin asennetun erikoistelin kuormitusvaikutusta ja Simossa ajolinjojen muuttumisen vaikutusta tien urautumiseen. Syksyllä 2018 toteutettiin modifioituna kevään 2018 kahden ensimmäisen päivän mittaukset Kyyjärvellä, koska keväällä 2018 roudan sulamisen jäljiltä tiivistymättömän tierakenteen tiivistyminen raskaiden ajoneuvojen vaikutuksesta mittauspäivien aikana johti liian erilaisiin lähtökohtiin luotettavan vertailun tekemiseksi eri päivien kuormitusten välillä. Lisäksi syksyllä 2018 haluttiin toistaa samanlainen kuormitus Ranuan (Mt 18824) soratiellä tutkimuksen kattavuuden lisäämiseksi.

Käsillä olevan raportin luvussa 2 on esitelty mittausmenetelmät ja kuormituskokeiden toteutustavat sekä luvussa 3 on kuvattu valitut mittauskohteet lyhyesti keskeisimmiltä osin välttämällä liiallista toistoa edellisestä raportista. Luvussa 4 on esitetty kohteittain mittauksen tulokset ja luvussa 5 on koottuna päätelmiä ja pohdintoja keskeisimmistä mittaushavainnoista. Viimeisessä luvussa 6 on kiteytetty tutkimuksen tuottamat tulokset.

## 2 Mittausmenetelmät

### 2.1 Tierakenteesta tehdyt pistemäiset mittaukset

#### 2.1.1 Dielektrisyys ja Percoaseman pitkäaikaiset seurantamittaukset

Käytännössä dielektrisyys kuvaa vapaan veden määrää mittausanturin ympärillä eli kuinka suuri osa materiaalin huokosista on kyllästynyt vapaalla vedellä, jolloin materiaalien tiiviysaste vaikuttaa dielektrisyyteen (Saarenketo 2001). Tutkimuksissa käytetyt anturit oli asennettu ajokaistan ulomman ajouran linjalle syksyllä 2016 tai sitä aiemmin. Percoasemalla mitataan eri syvyyksille asennetuista antureista määrävälein dielektrisyyttä, sähkönjohtavuutta tai lämpötilaa. Käytetyllä mittauslaitteella ja yhdellä modifioidulla Percometrillä voitiin nopeissa mittauksissa samaan aikaan mitata enintään neljää anturia ja kustakin anturista vain yhtä suuretta. Nopeissa mittauksissa mitattiin dielektrisyyttä (Vuorimies et al. 2018)

#### 2.1.2 Huokosvedenpaine

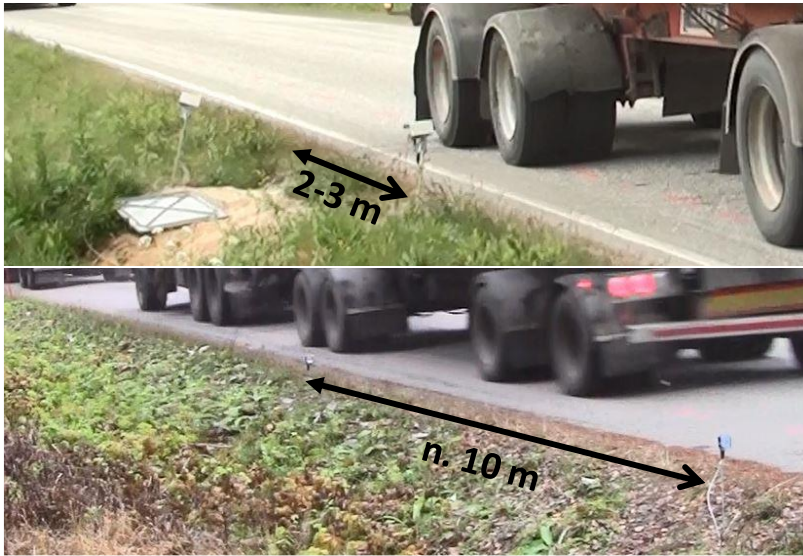
Vuoden 2018 kuormituksissa huokosvedenpainetta mitattiin Simon kohteessa keväällä 2018. Niiden mittauksen tarkoituksena oli havaita raskaiden ajoneuvojen mahdollisesti aiheuttama huokosveden ylipaine tai muutokset huokosvedenpaineessa. Antureita ja niiden asennustapaa on kuvattu aiemmassa julkaisussa Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015-2017 (Vuorimies et al. 2018).

#### 2.1.3 Päällysteen tai kulutuskerroksen alapinnan pystysiirtymä

Raskaiden ajoneuvojen aiheuttamien tien pinnan pystysiirtymien mittaamiseksi mittauskohteille asennettiin siirtymäantureita päällysteen tai kulutuskerroksen alapintaan. Aiemmassa tutkimuksessa anturit oli asennettu ulomman ajouran oletetulle keskilinjalle. Kevään 2018 tutkimuskohteissa asennettiin uudet pystysiirtymäanturit 0,5 metriä keskemälle tietä aiemmin asennettuihin antureihin verrattuna, jotta kohteissa olisi kaksi pystysiirtymäanturia eri ajolinjoilla. Kyyjärvellä korvattiin aiemmin rikkoutunut ajouran pystysiirtymäanturi uudella anturilla. Nopean toimeksiannon ja antureiden toimitusvaikeuksien vuoksi vuonna 2018 Kyyjärven ja Simon kohteiden anturit olivat erimerkkiset. Kyyjärven pystysiirtymäantureiden mittausalue oli 50 mm ja Simon koekohteelle asennetun pystysiirtymäanturin mittausalue oli 30 mm. Antureiden periaatteesta on lisätietoa julkaisussa Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015-2017 (Vuorimies et al. 2018).

#### 2.1.4 Kuormitusajoneuvon ajolinjan sijainti etäisyyslasereilla

Vuonna 2018 asennettiin tien reunaan siirtymäanturien linjalle tien reunaan kaksi etäisyyslaseria mittaamaan ajoneuvon sijaintia anturien kohdalta. Keväällä laserit olivat muutaman metrin ja syksyllä 2018 noin 10 metrin etäisyydellä toisistaan (kuva 1). Lasereiden yläpuolelle oli mahdollista asentaa tihkusateelta suojaava katos. Laserien suurin mittausetäisyys oli asetettu 5,0 metriin ja ne oli suunnattu mittaamaan ajoneuvon etäisyys pystysiirtymäanturin kohdalta noin 0,3–0,4 m tien pinnan yläpuolelta. Lisäksi videokameralla kuvattiin suurin osa tilattujen kuormitusajoneuvojen ylityksistä.



Kuva 1. Etäisyyslaserit kesäkuussa Simon (ylempi) ja lokakuussa Kyyjärven (alempi) kohteissa.

Kevään mittauksissa etäisyyslaserin asetuksissa mittaustiheys oli jäänyt normaalia hitaammaksi ja laser otti noin 40 mittausta sekunnissa, jonka vuoksi yhden renkaan kohdalta mittauspisteitä tallentui vain neljä tai viisi kappaletta. Tämän vuoksi varmuus renkaan sijainnista oli keväällä 2018 hieman heikompi kuin muina ajankohtina tehdyissä mittauksissa.

### 2.1.5 Kiihtyvyyssanturit

Keväällä 2018 asennettiin kuormitusta edeltävällä viikolla Kyyjärven ja Simon kohteisiin Murata Electronics Oy:n kiihtyvyyssantureita tien poikkileikkaukseen 0,25 m välein kuormitettavalle ajokaistalle. Kiihtyvyyssantureista oli tarkoitus määrittää integroimalla renkaan aiheuttama taipuma ja verrata sitä pystysiirtymäanturilla mitattuun pystysiirtymään. Samalla kiihtyvyyssantureilla voitiin karkeasti varmistaa kuormitusajoneuvon ajonlinjan sijaintia.

Kiihtyvyyssantureiden toimitusongelmien vuoksi Kyyjärvelle asennettiin saatavilla oleva anturityyppi. Tiehen asennettaessa kiihtyvyyssantureille porattiin ensin reiät. Kyyjärvellä viittä kiihtyvyyssanturia yhdistävä johto asennettiin niiden yläpuolelle. Simossa kuutta kiihtyvyyssanturia yhdistävä johto sijoitettiin kiihtyvyyssantureiden alle. Anturit yhdistävälle johdolle, joka menee mittauslaitteelle, leikattiin kapea ura päällysteen pintaan. Kun pystysuoraan tuetut kiihtyvyyssanturit ja johdot olivat niille tehdyillä paikoilla, ne suojattiin ja liimattiin tiehen bitumilla.



Kuva 2. Kyyjärven kohteen kiihtyvyyssantureita asennetaan 17.5.2018.

## 2.1.6 Tiedonkeruu mittausantureista

Ajoneuvoylitysten aikana mittausantureiden signaalit tallennettiin TTY:n käytössä olevalla rekisteröintilaitteistolla. Näytteenottotaajuus oli Kyyjärvellä keväällä 1 kHz ja syksyllä 2 kHz sekä Simossa keväällä 3 kHz ja Ranualla syksyllä 1 kHz. Rekisteröintilaitteeseen anturit liitettiin erillisten National Instrumentsin kytkentäyksiköiden välityksellä. KytKentäyksikköön sondit liitettiin adaptereilla joko mittausantureiden vahvistimilta tai suoraan.

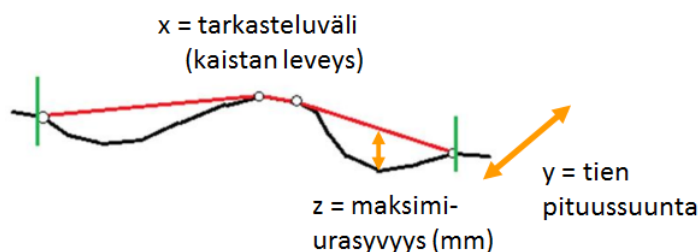
## 2.2 Tien pinnalta tehdyt mittaukset

### 2.2.1 Rakennepaksuudet ja kosteus maatutkamittauksella

Maatutkaluotaukset tehtiin Roadscanners Oy:n Road Doctor Survey Van (RDSV) -mittausajoneuvolla GSSL:n SIR30 -tutkakalustolla käyttäen 2,0 GHz ilmastiantennia ja 400 MHz maavasteantennia. Mittaukset tehtiin ajokaistan ulko-urasta ennen kuormituksia ja jokaisen kuormitusvaiheen jälkeen. Yhdestä maatutkamittauksesta tulkittiin tien rakennepaksuudet. Kosteustilan muutoksia seurattiin Roadscanners Oy:n rakenteiden kuivatuksen seurantaan kehittämällä menetelmällä, jossa 400 MHz datasta lasketaan taajuusspektri ja sen muutokset. Hieman tarkempaa taustaa menetelmästä on esitetty aiemmassa tutkimusraportissa Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015–2017. (Vuorimies et al. 2018)

### 2.2.2 Urakasvu laserkeilauksella

Kohteiden urasyvyysmittaukset tehtiin niin ikään RDSV-kalustolla. Ajorata keilattiin ennen kuormituskokeita ja aina kunkin kuormituksen jälkeen. Mittauksen jälkeen laserkeilaustiedostoista laskettiin urakartat ja myös maksimiurasyvyys ja sen kehittyminen (urakasvu). Kuvassa 3 on esitetty urasyvyyden laskennan periaate laserkeilauksessa. Laskennassa tarkasteluvälille (vihreiden viivojen väli) asetetaan kuvitteellinen kiristetty lanka (punainen viiva). Maksimiurasyvyys on suurin pystysuora etäisyys tien pinnasta tähän lankaan. Mitatuista maksimiurasyvyyksistä voidaan edelleen laskea keskiarvo halutulle matkalle tien pituussuunnassa. Laseraineistosta voitiin määrittää myös tien poikkeileikkaustiedot.



Kuva 3. Urasyvyyden laskentatavan periaate laserkeilauksessa.

## 2.3 Kuormitustavat ja kuormitusajoneuvot

Taulukossa 1 on esitetty tutkimuksen kuormitusajoneuvoiksi tilattujen peräkkäin kulkevien rekkojen lukumäärät ja niiden akseleiden lukumäärät sekä arvioidut tai mitatut yhteispainot ja suurimmat akselipainot kullakin mittauskerralla. Liitteessä 1 on esitetty kuormitusajoneuvojen yhteispainot mittauspäivinä, ylitysten lukumäärät ja akselipainot- ja välit sekä rengastiedot. Kohteilla ajonopeus oli ylityksissä noin 50 km/h.

Vuoden 2018 kuormituskokeissa käytettiin 7-akselisia 60–64 tonnin sora- tai tukkirekkoja. Poikkeuksena oli Kyyjärvi 24.5.2018, jolloin tutkimuskohdetta kuormitti tukkirekka, jossa perävaunun viimeiseen teliin oli rakennettu erikoisteli. Erikoistelissä oli kolme tavallista akselia ja niiden väleissä oli kaksi erikois-akselia, joissa oli paripyörä muiden akselien renkaita sisempänä perävaunun keskellä (kuva 4). Erikoisakseleille tulevan painon määrää pystyi muuttamaan.

*Taulukko 1. Tutkimukseen kuormitusajoneuvoksi tilattujen rekkojen arvioidut tai mitatut tiedot: peräkkäin kulkevien rekkojen lukumäärä, niiden yhteispaino ja akseleiden lukumäärä ylityksessä sekä niistä suurin akselipaino ja ylitysten lukumäärä.*

	rekkoja peräkkäin	akseleita peräkkäin	suurin akselipaino	yhteis- paino (tn)	ylityksiä
Simo 5.6.2018	1	7-aks	10 tn	64	14
Simo 6.6.2018	2	14-aks	10 tn	126	7
Simo 7.6.2018	1	7-aks	10 tn	64 / 62	16
Kyyjärvi 22.5.2018	1	7-aks	10 tn	64	16
Kyyjärvi 23.5.2018	2	14-aks	11 tn	128	8
Kyyjärvi 24.5.2018	1	8 (+2) -aks <sup>*)</sup>	10 tn	65,1	16
Kyyjärvi 23.10.2018 <sup>ap)</sup>	2	14-aks	10 tn	124,5	5 <sup>1)</sup>
Kyyjärvi 23.10.2018 <sup>ip)</sup>	1	7-aks	9 tn	60	10 <sup>2)</sup>
Kyyjärvi 24.10.2018 <sup>ap)</sup>	1	7-aks	9 tn	60	10
Kyyjärvi 24.10.2018 <sup>ip)</sup>	2	14-aks	10 tn	124,5	5
Ranua 2.10.2018 <sup>ap)</sup>	2	14-aks	10 tn	125	5
Ranua 2.10.2018 <sup>ip)</sup>	1	7-aks	10 tn	63	10
Ranua 3.10.2018 <sup>ap)</sup>	1	7-aks	9,5 tn	62	10
Ranua 3.10.2018 <sup>ip)</sup>	2	14-aks	10 tn	125	5

<sup>ap)</sup> aamupäivä

<sup>ip)</sup> iltapäivä

<sup>\*)</sup> viimeisessä telissä oli kaksi lisäakselia, joiden renkaat olivat muita sisempänä

<sup>1)</sup> toinen rekoista ajoi pois ei kuormitettavaa kaistaa pitkin kuormitussarjan jälkeen

<sup>2)</sup> ajoi pois ei kuormitettavaa kaistaa pitkin kuormitussarjan jälkeen





Kuva 4. Kyyjärvellä 24.5.2018 kuormituksissa käytetty erikoisteli perästäpäin kuvattuna.

Simon kohteella keväällä kuormitusajoneuvo ajoi mittausalueen yli aina samaan suuntaan. Mitattavan puolen ajokaista suljettiin muulta liikenteeltä ennen mittausten alkua ja avattiin takaisin muulle liikenteelle mittausten loputtua. Ensimmäisenä päivänä Simon kohteella kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi vuorotellen 20 minuutin välein samaa ajouralinjaa pitkin. Seuraavana päivänä kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi peräkkäin 40 minuutin välein samaa ajouralinjaa pitkin kuin edellisenä päivänä. Kolmantena mittauspäivänä kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi vuorotellen 20 minuutin välein ennalta määrättyssä järjestyksessä neljää eri ajolinjaa pitkin. Liitteessä 2 on esitetty Simon koekohteen toteutuneet kuormitusajot.

Kyyjärven kohteella keväällä 2018 mittauspiste ylitettiin kumpaankin suuntaan ajettaessa. Ensimmäisenä päivänä Kyyjärven kohteella 7-akselinen kuormitusajoneuvo ajoi 20 minuutin välein samaa ajouralinjaa pitkin 10 ylitystä, joiden jälkeen oli vajaan kahden tunnin tauko. Tauon jälkeen kuormitusajoneuvon ajolinjoja muutettiin. Seuraavana päivänä kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi viisi kertaa peräkkäin 40 minuutin välein samaa ajouralinjaa pitkin ennen vajaan kahden tunnin taukoa. Tauon jälkeen kahden peräkkäin kulkevan kuormitusajoneuvon ajolinjoja muutettiin. Kolmantena päivänä koekohteella kulki kuormitusajoneuvo, jonka perävaunun viimeisen teli oli erikoisrakenteinen, ajaen samaa ajouralinjaa. Ennen taukoa tehdyillä kymmenellä ylityksellä erikoistelillä käytettiin samaa painon jakautumista ja tauon jälkeen telin keskellä oleville pyörille tulevaa kuormitusta varioitiin. Liitteessä 2 on esitetty Kyyjärven koekohteella keväällä 2018 toteutuneet kuormitusajot.

Kyyjärven ja Ranuan kohteilla syksyllä 2018 ajettiin samaa ajouralinjaa pitkin ja mittauspiste ylitettiin kumpaankin suuntaan ajettaessa. Ensimmäisen mittauspäivän aamupäivänä kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi peräkkäin viisi kertaa 40 minuutin välein Kyyjärvellä ja 30 minuutin välein Ranualla ennen vajaan kahden tunnin taukoa. Ensimmäisen mittauspäivän iltapäivällä 7-akselinen kuormitusajoneuvo ajoi vastaavasti 20 minuutin välein Kyyjärvellä ja 15 minuutin välein Ranualla kymmenen ylitystä. Toisena päivä kuormitusten järjestys oli päinvastainen eli aamupäivällä ajoi 7-akselinen kuormitusajoneuvo kymmenen ylitystä ja tauon jälkeen iltapäivällä kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi peräkkäin viisi kertaa.

## 3 Mittauskohteet

### 3.1 Vuoden 2018 mittauskohteiden valintaperusteet

#### 3.1.1 Kevään 2018 mittaukset

Vuosina 2015–2017 tehdyissä mittauksissa viimeisenä vuonna mittausten fokus kohdistui 7-akselisen rekan ja kahden peräkkäin kulkevan 7-akselisen rekan aiheuttamien urasyvyyksien ja pysyvien pystysiirtymien eroihin, kun sama massa kulkee samassa ajassa mittauskohteen yli. Koska keväällä 2017 Simon kohteella vilkas muu raskas liikenne esti tämän vertailun tekemisen, haluttiin vertailu uusia Simon kohteella varmistaen liikenteen ohjauksella, että muu liikenne ei vaikuta mittauspäivän aikana mittaustuloksiin. Lisäksi Simon kohteella haluttiin tutkia hallitusti ajolinjan vaikutusta uran syvyyteen ja tienpinnan pystysiirtymiin.

Kyyjärven kohteella tien pinnan siirtymiä mittaava pystysiirtymäanturi ei toiminut keväällä 2017, jolloin anturilla ei saatu vertailuaineistoa urasyvyyden mittaustuloksille. Lisäksi haluttiin varmistus vuoden 2017 7-akselisen rekan ja kahden peräkkäin kulkevan 7-akselisen rekan kuormitusten vertailun tutkimustulokselle. Kun lisäksi aiemmissa tutkimuksissa oli muilla kohteilla havaittu kuormitusajoneuvon ajolinjan vaikuttavan merkitsevästi päällysteen pinnan pysyviin siirtymiin, haluttiin kuormitusajoneuvon ajolinjan muuttumisen vaikutuksesta urasyvyyden muutoksiin ja tien pinnan pysyvään siirtymään lisää tutkimustietoa. Edellä mainitut kuormitukset suunniteltiin toteuttaviksi kahden päivän aikana, jolloin kolmantena mittauspäivänä mittausaluetta kuormitti erikoistelin omaavalla perävaunulla varustettu rekka.

#### 3.1.2 Syksyn 2018 mittaukset

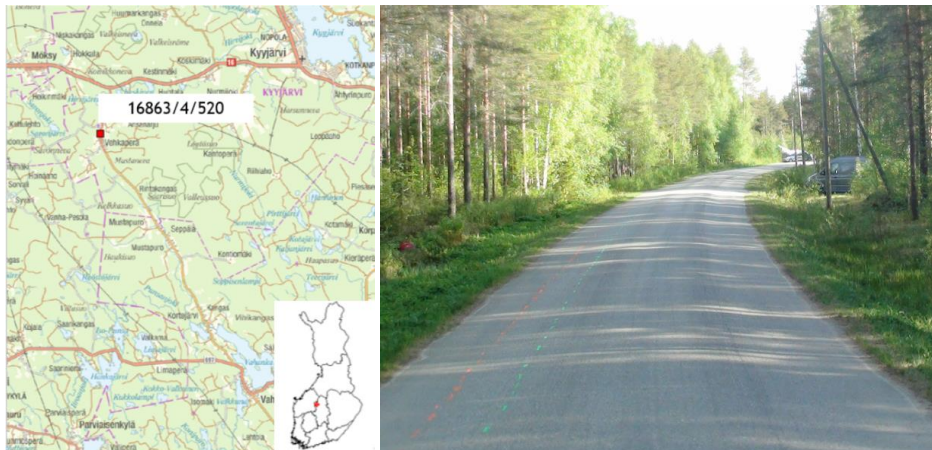
Kyyjärven kohteella keväällä 2018 tehtyjen mittausten aikana vähäliikenteinen tie ei ollut tiivistynyt roudan sulamisen jäljeltä ennen kuormitusten aloittamista. Tämän vuoksi tien runko ja pohjamaa tiivistyivät huomattavasti varsinkin ensimmäisen mittauspäivän aikana aiheuttaen eri päivien vertailulle erilaiset lähtökohdat. Kun lisäksi ensimmäisenä päivänä urasyvyyttä mittaavan laserkeilaimen data ei tallentunut ensimmäiseltä tusinalta ylityksiä, vertailu 7-akselisen rekan ja kahden peräkkäin kulkevan 7-akselisen rekan kuormitusten välillä saman massan kulkiessa samassa ajassa mittauskohteen yli haluttiin uusia syksyllä mahdollisimman tasapuolissa olosuhteissa.

Tausta-aineiston laajentamiseksi haluttiin samanlainen hallitusti tasapuolissa olosuhteissa tehty vertailu, kuin mitä syksyllä 2018 Kyyjärvellä oli tarkoitus tehdä, toteuttaa myös soratiellä. Tällöin kuormituskohteeksi valikoitui Ranuan koekohde, jossa oli tehty HCT-kuormituksia syksyllä 2016 (Vuorimies et. al. 2018).

## 3.2 Mittauskohteet ja niissä käytetyt mittausmenetelmät

### 3.2.1 Mt 16863 Kyyjärvi

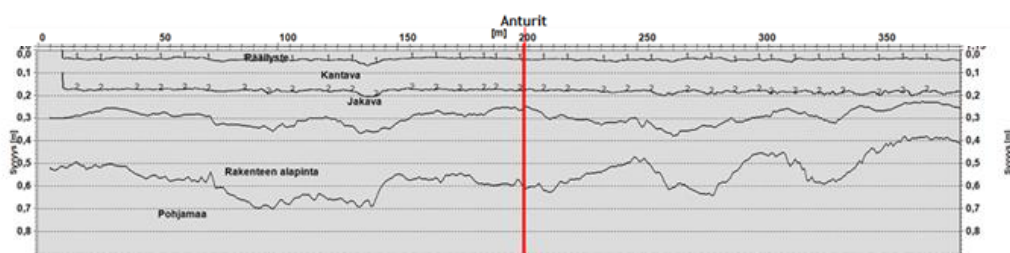
Kohde sijaitsee osoitteessa Vehkaperäntie 1560 (Tie 16863, tieosa 4, paalu 520). Kyyjärven mittauskohteen sijainti kartalla on esitetty kuvassa 5 vasemmalla ja Kyyjärven mittausalueen yleiskuvasta keväältä 2018 nähdään maaston olevan mittauskohteessa pääosin tasaista (kuvassa 5 oikea puoli). Keskimääräinen vuorokausiliikenne kohteella on ollut noin 50 ajoneuvoa vuorokaudessa.



Kuva 5. Kyyjärven (16863/4/520) mittauskohteen sijainti vasemmalla (Liikenneviraston Tiemappi karttapalvelu) ja oikealla yleiskuva mittausalueelta 24.5.2018.

Tien päällysrakenne kohteella oli noin 0,6 m paksuinen. Mittauskohteen päällyste oli paksuudeltaan keskimäärin 30–40 mm ja kantavan kerroksen paksuus noin 150 mm. (kuva 6) Mittauskohteen pohjamaa oli pohjamaakartan mukaan turvetta. Tien leveys oli noin 5,8–6 m ja tien tasausviiva sijaitsi noin 0,5 m ympäröivän maaston yläpuolella. Päällysteessä oli havaittavissa loiva-piirteistä urautumista ja pituushalkeamia. (Vuorimies et.al. 2018)

Tiellä 16863 on todennäköisesti tehty aiemmin sekoitusjyrsintää noin 200 mm syvyydelle ja asennettu paikoin teräsverkkoja, mutta mittauskohteeksi valitulla tieosuudella ei ollut toteutettu kumpaakaan toimenpidettä. Kohteella BCI-arvot olivat reilusti yli 100 ja se oli tieosan pehmeintä aluetta. (Vuorimies et. al. 2018)



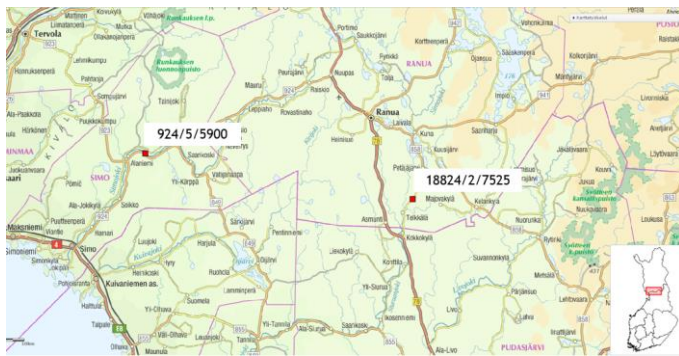
Kuva 6. Kyyjärven mittauspaikan kohdalta maatutkamittauksen 2,0 GHz ilmastiantennin ja 400 MHz maa-vasteantennin dataista tehdyt kerrosten paksuustulkinnat.

Kyyjärvellä asennettiin 17.5.2018 kaksi päällysteen alapinnan siirtymää mittaava anturia, joista toinen uran keskelle ja toinen 0,5 m keskemälle tietä 0,2 m ennen ajouran anturia tienpituussunnassa. Lisäksi ajokaistalle asennettiin yhteen riviin 0,25 m välein 10 kpl kiihtyvyyssantureita. Kahdella etäisyyslaserilla mitattiin ajoneuvon ajolinjan etäisyys antureiden kohdalla. Antureiden sijainnit on esitetty liitteessä 3.

Kyyjärven kohteella mitattiin tien pinnalta laserkeilaimella urasyvyyttä ja maatutkalla kosteuden muutoksia.

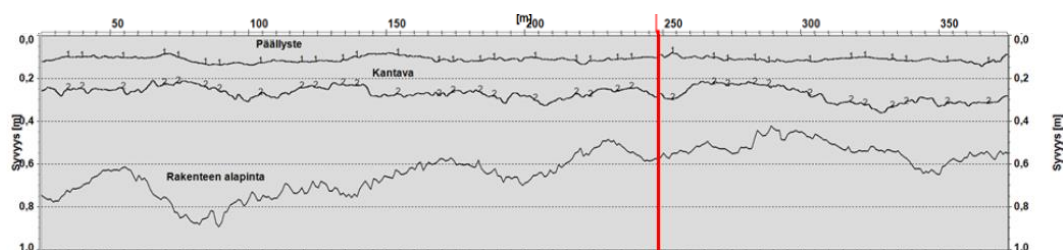
### 3.2.2 Mt 924 Simo

Simon mittauskohde sijaitsee osoitteessa Ranuantie 300 (Tie 924, tieosa 5, paalu 5900) Simojoen laaksossa (kuva 7). Kohteen pohjoispuolella on tiheää sekametsää ja eteläpuolella peltoaukeaa. Keskimääräinen vuorokausiliikenne kohteella on ollut noin 500 ajoneuvoa vuorokaudessa. (Vuorimies et. al. 2018)



Kuva 7. Simon (924/5/5900) ja Ranuan (18824/2/7525) kohteiden sijainnit. (Liikenneviraston Tiemappi karttapalvelu).

Kohteen päällysrakenne oli noin 0,6 m paksuinen. Päällysteen (PAB) paksuus oli noin 110 mm, kantavan kerroksen paksuus noin 200 mm ja suodatinkerroksen noin 300 mm (kuva 8). Pohjamaan oletettiin kohteella olevan silttiä tai silttistä hiekkaa, mutta kohteelta tehtyjen asennusten ja otettujen näytteiden perusteella se oli tasarakeista hiekkaa. Vuonna 2016 asennuksen yhteydessä tierakenteen kantavasta kerroksesta sekä pohjamaasta syvyyksiltä 0,8–0,9 m ja 1 m otetuista näytteistä tehtyjen TS-kokeiden ja rakeisuusmääritysten tulokset löytyvät vuosien 2015–2017 tutkimustulosten (Vuorimies et. al. 2018) yhteydestä. Kohteella tehtyjen TSD-mittausten perustella tie on altis tyypin 2 urautumiselle TSD-mittausten BCI-arvojen vaihdellessa 50–80 välillä. Kohteen antureiden asennustöiden yhteydessä syksyllä 2016 tehtyjen havaintojen perustella pohjaveden pinnan arvioitiin sijaitsevan kohteella noin 1,7 m syvyydessä. (Vuorimies et. al. 2018)



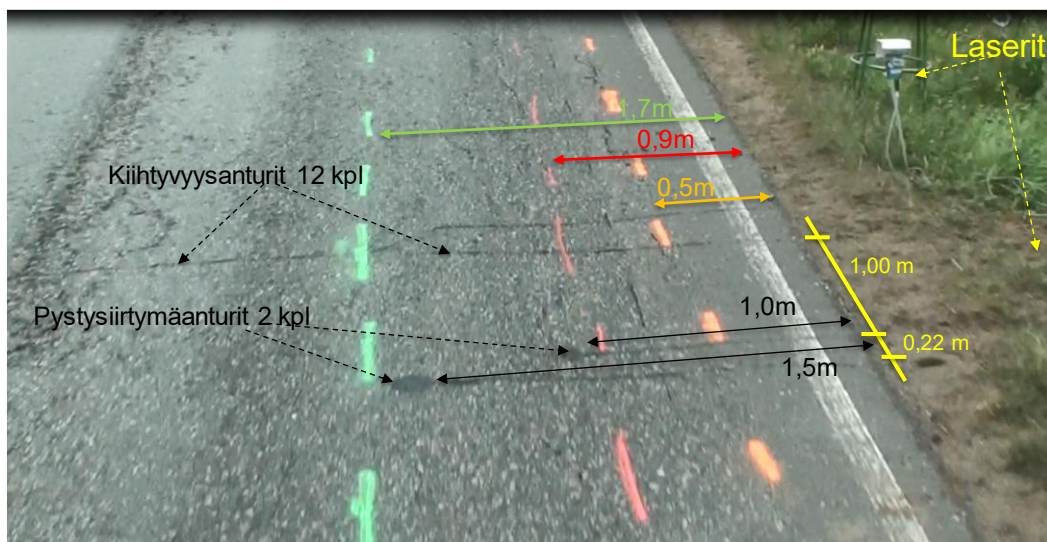
Kuva 8. Simon mittauspaikan kohdalta maatutkamittauksen 2,0 GHz ilmastantennin ja 400 MHz maa-vasteantennin datoista tehdyt kerrosten paksuustulkinnot.



Tien leveys on noin 5,8-6,0 m ja tien tasausviiva sijaitsee noin 0,5 m pellon pinnan yläpuolella. Kohteella sivuojat toimivat asianmukaisesti, mutta laskuoja oli tukossa syksyllä 2016. Tämä on luultavasti aiheuttanut ongelmia kohteen kuivatuksessa. (Vuorimies et.al. 2018)

Mittauspäivänä Simossa mitattiin dielektrisyttä pistemäisesti 0,15 m, 0,25 m, 0,35 m ja 0,65 m syvyyksiltä uran keskeltä. Huokosvedenpaineanturit olivat uran keskeltä hieman tien reunaa kohden 1,5 m ja 2,0 m syvyyksillä. Toisen ajouran keskellä olevista aiemmin asennetuista päällysteen alapinnan siirtymäantureista havaittiin olevan rikki asennettaessa uusia antureita 31.5.2018. Viikkoa myöhemmin kuormitusten aikana ehjä pystysiirtymäanturi oli mittausalueensa reunalla epälineaaraisella alueella, jolloin siitä mitatut tulokset eivät olleet käyttökelpoisia. Uusi päällysteen alapinnan siirtymää mittaava pystysiirtymäanturi asennettiin 31.5.2018 1,5 m tien reunasta eli 0,5 m kesemmälle tietä vuonna 2016 asennetusta toimivasta pystysiirtymäanturista (kuva 9). Ajo-kaistalle asennettiin yhteen riviin 0,25 m välein 12 kpl kiihtyvyyssantureita. Kahdella etäisyyslaserilla mitattiin ajoneuvon ajolinjan paikka. Antureiden sijainnit on esitetty liitteessä 3.

Simon kohteella mitattiin tienpinnalta laserkeilaimella urasyvyyttä ja maatutkalla kosteuden muutoksia.



Kuva 9. Simon kohteen tien pinnassa olevien antureiden sijainnit ja 7.6.2018 tien pintaan piirretyt ajolinjojen ohjausviivat.

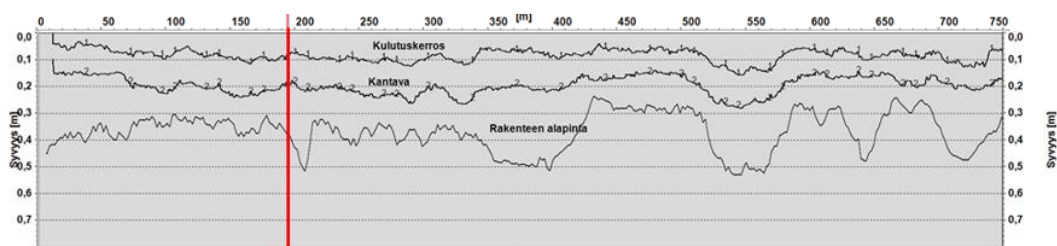
### 3.2.3 Mt 18824 Ranua

Mittauskohde sijaitsee Ranualla tieosoitteessa Telkkäläntie 77 (Tie 18824, tieosa 2, paalu 7525). Kohteen sijainti on esitetty kuvassa 7. Kuvasta 10 nähdään tien olevan suora ja maaston melko tasainen. Keskimääräinen vuorikausiliikenne kohteella on ollut noin 50 ajoneuvoa vuorokaudessa. (Vuorimies et. al. 2018)



Kuva 10. Näkymä Ranuan mittauskohteesta Kokkokylään päin 2.10.2018.

Tierakenne oli hieman alle 0,5 m paksuinen (Kuva 11). Soratien kulutuskerros oli noin 0,1 m paksuinen, tien uusi kantava kerros oli noin 0,1 m paksuinen ja vanha kantava/jakava kerros oli noin 0,25 m. Rakenteen alapuolella oli noin 0,25 m paksuinen kerros käsiteltyä pohjamaata/pengertä. Pohjamaa kohteella oli turpeen sekaista silttimoreenia, joka oli käytännössä vedellä kyllästynyttä. Pohjaveden pinta vaihtelee normaalisti 0,5–0,8 m syvyydellä. Tien leveys oli noin 5,4 m ja tien tasausviiva sijaitsi 0,3–0,4 m ympäröivän maaston yläpuolella. (Vuorimies et. al. 2018) Molempien sivuojien pohjalla oli hieman vettä syksyn 2018 kuormituksen aikana kuten oli ollut myös syksyllä 2016. Punaisen pystyviivan kohdalla sijaitsi Percoasema, jonka kohdalla pistemäiset mittaukset tehtiin.



Kuva 11. Ranuan mittauspaikan kohdalta maatutkamittauksen 2,0 GHz ilmapasteantennin ja 400 MHz maa-vasteantennin datoista tehdyt kerrosten paksuustulkinnat. Punaisen viivan kohdalla sijaitsi Percoasema.

Ranualla kuormitusten aikana dielektrisyyttä mitattiin pistemäisesti 0,15 m, 0,5 m, 0,8 m ja 1,1 m syvyyksiltä ulkouran keskeltä. Syksyllä 2018 huokospaineanturista ei saatu mittausdataa. Kulutuskerroksen alapinnan siirtymää mitattiin yhdellä siirtymäanturilla ulkouran keskeltä. Syksyllä 2016 asennettu pystysiirtymäanturi oli odotetusti rikki. Antureiden sijainnit on esitetty liitteessä 3.

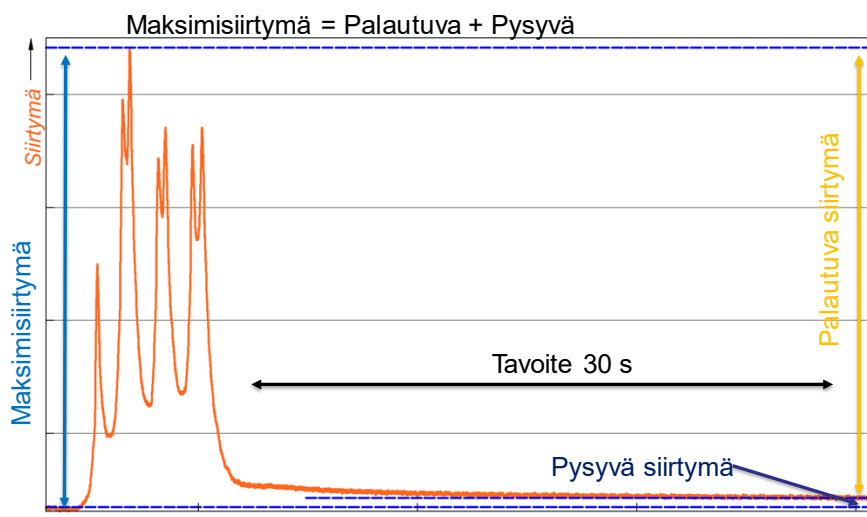
Ranualla mitattiin tienpinnalta laserkeilaimella urasyvyyttä ja maatutkalla kosteuden muutoksia.

## 4 Mittaustulokset

### 4.1 Mittaustulosten esittelyssä käytettyä terminologiaa

Pystysiirtymiä esittelevissä kuvaajissa on käytetty kuvassa 12 esitettyjä termejä. Pysyvä siirtymä on pyritty määrittämään 30 sekuntia kuormitusajoneuvon ylityksen jälkeen. Tästä on poikettu muiden ajoneuvojen siirtymään aiheuttamien muutosten takia tai RSDV-mittausauton ajaessa anturin yli hieman aiemmin. Laskettaessa yhteen ajoneuvojen ylityksistä muodostuneita pysyviä siirtymiä on käytetty yhtä termiä:

- Todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä lasketaan vähentämällä ajoneuvon jälkeisestä pystysiirtymälukemasta mittausten alkaessa mitattu pystysiirtymälukema



Kuva 12. Periaatekuva maksimisiirtymän ja pysyvän siirtymän määrittämisestä mittausdatasta. (Vuorimies et. al. 2018)

MDI (Moisture Damage Index) kuvaa numeerisessa muodossa samaa asiaa (kyllästysaste), mitä esitetään graafisesti maatutkadatasta lasketussa kosteusprofiilissa. Rakenteen yläosalle, keskiosalle ja alaosalta lasketaan omat lukuarvonsa ja näistä lasketaan vielä edelleen painotettu kokonaisarvo (Total MDI). Menetelmää on osittain edelleen kehitysvaiheessa ja tulee muistaa, että MDI ei vastaa suoraan kuinka kostea materiaali on, vaan se reagoi ennen kaikkea, kun kyllästysaste nousee lähelle ja yli 70–80 %:n kyllästysasteen. Arvoja ei ole myöskään kalibroitu täysin vielä suomalaisille materiaaleille. Oleellista tulosten arvioinnissa on verrata suhteellista muutosta MDI:ssä kuormitusten aikana. (Vuorimies et.al.2018)

## 4.2 Mt 1683 Kyyjärvi – kevät ja syksy 2018

### 4.2.1 Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet

Kyyjärven kohteella päällysteen paksuus on 30–40 mm, päällysrakenteen kokonaispaksuus on noin 0,6 m ja pohjamaa on turvetta. Koska kohteella ei ole Percoasemaa, pitkäaikaista mittausdataa ei ole tien kosteustilasta. Keväällä 2018 ennen mittauksia oli pitkä ja lämmin kausi, jolloin tierakenteessa ja pohjamaassa ollut routa oli sulanut nopeasti. Ennen mittauksia oli 2,5 viikkoa sateetonta edellisen sadepäivän ollessa alueella 4.5.2018. Ennen mittauksia alueen 17 vuorokauden keskimääräinen keskilämpötila oli 13,3 °C sekä keskimääräiset ylimmät ja alimmat lämpötilat olivat 21,3 °C ja 3,0 °C. Mittauspäivinä 22.–24.5.2018 keskilämpötilat olivat aavistuksen alhaisempia ensimmäisen mittauspäivän ollessa lämpimin niistä. (Ilmatieteen laitos, 2019)

Syksyllä 2018 ennen mittauksia alueen 17 vuorokauden keskilämpötilojen keskiarvo oli 7,1 °C sekä keskimääräiset ylimmät ja alimmat lämpötilat olivat 11,0 °C ja 2,8 °C. Kaksi vuorokautta ennen mittauksen alkamista alueella satoi 14 mm sateiden ollessa muuten vähäisiä lokakuussa. (Ilmatieteen laitos, 2019).

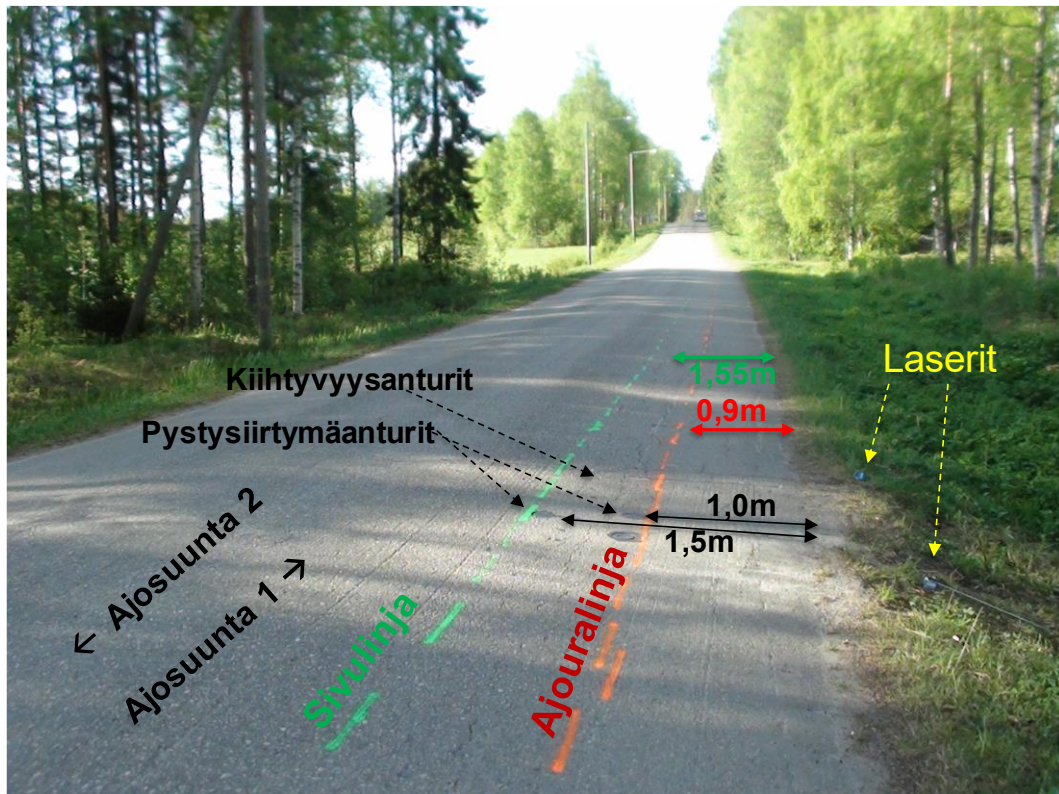
Mittauspäivinä lähimmän mittausaseman lämpötilahavainnot olivat satunnaisia. Ensimmäisen mittauspäivän aamulla lämpötila kävi hieman pakkasen puolella ja päivällä lämpötila oli noin 5 °C. Mittauspäivien välisenä yönä oli pakkasta ja päivällä lämpötila nousi noin +2 °C. Pakkasyö saattoi hieman vaikuttaa 24.10.2018 mittauspäivän tuloksiin.

### 4.2.2 Päällysteen alapinnan pystysiirtymät

#### 4.2.2.1 Kevät 22.5.2018 - yksi kuormitusajoneuvo

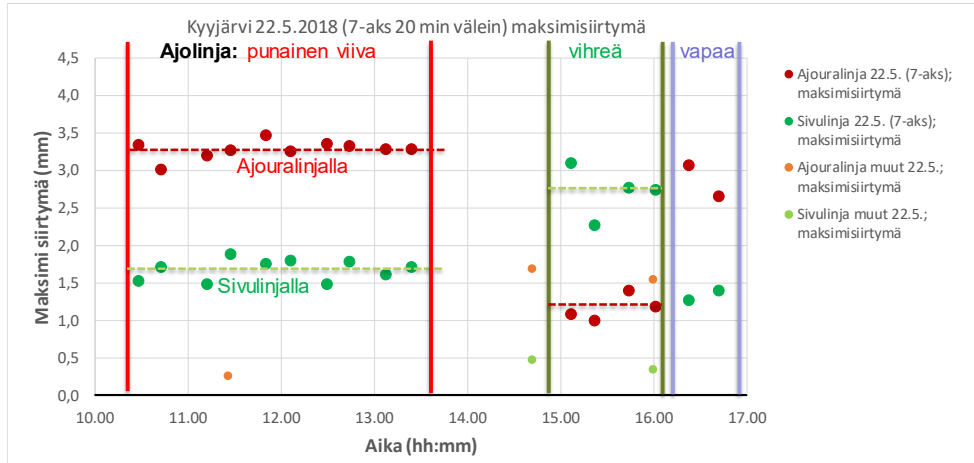
Keväällä 2018 Kyyjärvellä kuormitusajoneuvot ajoivat pääasiallisesti kuvassa 13 esitettyjä kahta ajolinjaa pitkin, joista toinen oli ajouran kohdalle sijoitettu ajouralinja (punainen viiva) ja toinen 0,65 m keskemälle tietä piirretty sivulinja (vihreä viiva). Tavoitteena oli, että ohjausakselin pyörä kulkisi keskellä tiehen merkittyä viivaa. Kuvassa 13 on myös näytetty pistemäisten mittausantureiden sijainnit. Ajourassa olevaa pystysiirtymäanturia on kutsuttu jäljempänä ajouralinjan anturiksi ja siitä 0,5 m keskemälle tietä asennettua anturia sivulinjan anturiksi. Toteutunut ajosuunnitelma on esitetty liitteessä 2.





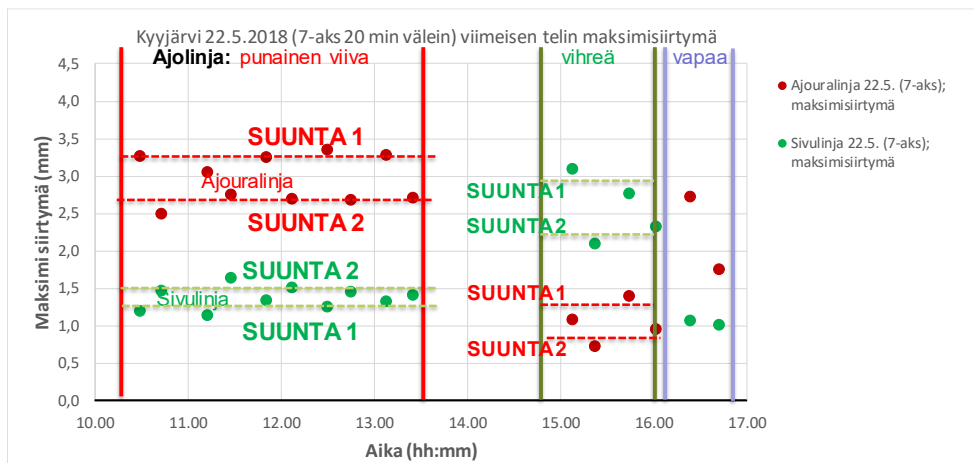
Kuva 13. Kyyjärven kohteen ajolinjat ja pistemäiset anturit keväällä 2018.

Kevään 2018 ensimmäisenä mittauspäivänä Kyyjärvellä mittausaluetta kuormitti yksi 64 tonnin 7-akselinen tukkirekka 20 minuutin välein kumpaankin suuntaan ajaessaan. Kuvassa 14 on esitetty 22.5.2018 kuormitusajoneuvojen ylityksistä mitatut päällysteen maksimisiirtymät sekä suurimmat muiden raskaiden ajoneuvojen aiheuttamat maksimisiirtymät. Kuormitusajoneuvon ajaessa aamupäivällä ajouralinjaa ylitysten aiheuttamat maksimisiirtymät ajouralinjalla olivat 3,2–3,4 mm ja sivulinjalla 1,5–1,8 mm. Iltapäivällä kuormitusajoneuvon ajolinjan muuttuessa 0,65 m keskemälle tietä havaitaan eri antureista mitattujen arvojen kääntyneen odotetusti suuruusjärjestykseltään päinvastaisiksi, mutta niiden lukemien hieman pienentyneen. Lopuksi ajetuilla vapailla ajolinjoilla kuormitusajoneuvo kulki lähellä tien reunaa, jolloin antureista mitatut arvot olivat lähellä aamupäivän arvoja. Kuormitusajoneuvojen lisäksi 22.5.2018 tiellä kulki yksi tukkirekka, kaksi 4-akselista sora-autoa sekä täynnä että tyhjänä. Lisäksi kohteen ohitti iltapäivällä kahdesti traktori, jonka yksiakselinen peräkärry oli täynnä soraa. Rekat ohittivat anturit etäältä, joten traktorin perävaunun aiheuttamat noin 1,5 mm maksimisiirtymät olivat suurimmat muista ajoneuvoista mitatut pystysiirtymät.



Kuva 14. Kyjjärven kohteella 22.5.2018 mitatut maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.

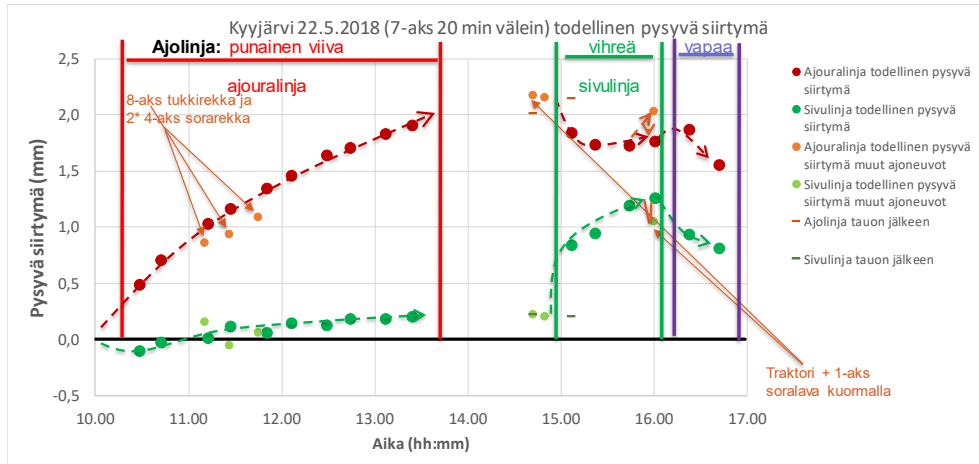
Kuvassa 15 on esitetty kuormitusajoneuvojen viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät samalla tavalla kuin kuvassa 14. Kuvasta 15 nähdään, että ajo-suunnalla oli selkeä merkitys viimeisen telin aiheuttamaan maksimisiirtymään. Tämä johtunee perävaunun hakeutumisesta hieman erilaiselle linjalle ajettaessa kaartavalla tiellä mittauskohdan yli eri suunnista. Viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät olivat varsinkin suuntaan 2 ajettaessa pienempiä kuin kuormitusajoneuvon aiheuttamat maksimisiirtymät.



Kuva 15. Kyjjärven kohteella 22.5.2018 mitatut kuormitusajoneuvon viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.

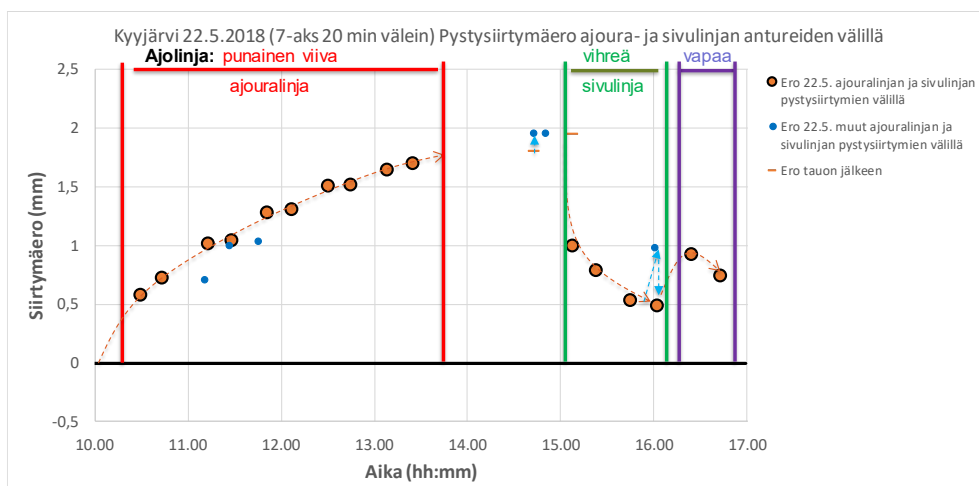
Kuvassa 16 on esitetty kuormitusajoneuvojen ja muiden raskaiden ajoneuvojen ylitysten jälkeinen tien pinnan todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä siirtymäantureiden kohdalla. Muut rekat eivät kulkeneet mittausantureilla varustetulla kaistalla, mutta sorakuormattu traktori kulki. Kuormitusajoneuvojen kulkiessa aamulla ajouralinjaa (punainen viiva) pitkin tien pinnan pysyvä siirtymä uran kohdalla oli 10 ylityksen jälkeen 2 mm ja ylitysten määrän kasvaessa pysyvä siirtymä ylitystä kohden pieneni. Sivulinjalla tien pinnan pysyvä siirtymä oli pieni. Tauon jälkeen sama kuormitusajoneuvo ylitti neljä kertaa mittausalueen sivulinjaa (vihreä viiva) pitkin eli se kulki noin 0,65 m keskeemmällä tietä kuin aamulla. Tällöin sivulinjan kohdalla tien pinnan pysyvä siirtymä oli erityisen suuri ensimmäisellä ylityksellä ja uran kohdalla tien pinta kohosi. Kahdella viimeisellä ylityskerralla kuormitusajoneuvo ajoi ajouralinjan ja tien

reunan välissä, jolloin mittauspisteiden kohdalla tien pinta kohosi. Muiden ajoneuvojen aiheuttamilla pysyvillä siirtymillä ei näyttänyt olevan merkittävää vaikutusta pysyvän siirtymän pitkäaikaiseen käyttäytymiseen mittauspisteissä, vaikka ne hetkellisesti vaikuttivat pysyvän siirtymän suuruuteen.



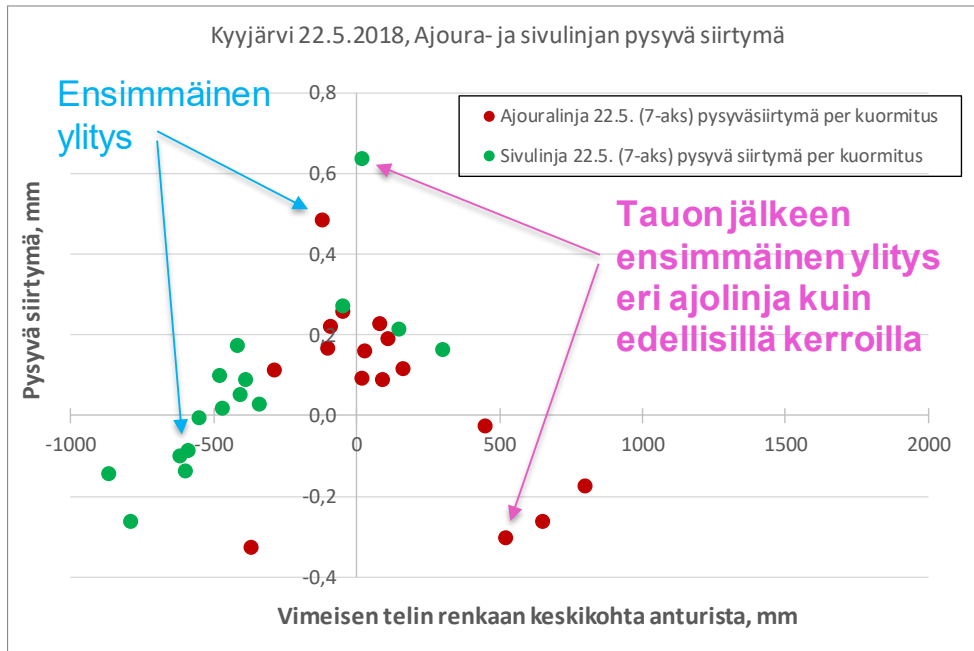
Kuva 16. Kyyjärven kohteella 22.5.2018 ajoneuvojen ylitysten jälkeen pystysiirtymäantureilla mitatut tien pinnan pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalla.

Kuvassa 17 on esitetty kuvan 16 mittautulokset, kun ajouralinjan pysyvästä siirtymästä on vähennetty sivulinjan pysyvä siirtymä. Tämä erotus voisi kuvata paikallista urasyvyyden kasvua antureiden sijaitessa 0,5 m etäisyydellä toisistaan. Kymmenen ensimmäisen ylityksen aikana eroa oli tullut noin 1,8 mm, mutta tauon jälkeen eri ajolinjalla tehdyn yhden ylityksen jälkeen se oli 1 mm ja neljän ylityksen jälkeen enää 0,5 mm. Täten kuormitusajoneuvon ajolinja vaikutti merkittävästi päällysteen pinnan pystysiirtymäantureilla mitattuun pysyvien siirtymien eroon suuruuteen Kyyjärven kohteen ohutpäällysteisellä tiellä, joka sijaitsee turpeisella pohjamaalla.



Kuva 17. Kyyjärven kohteella 22.5.2018 ajoura- ja sivulinjan pysyvien siirtymien ero ajoneuvojen ylitysten jälkeen.

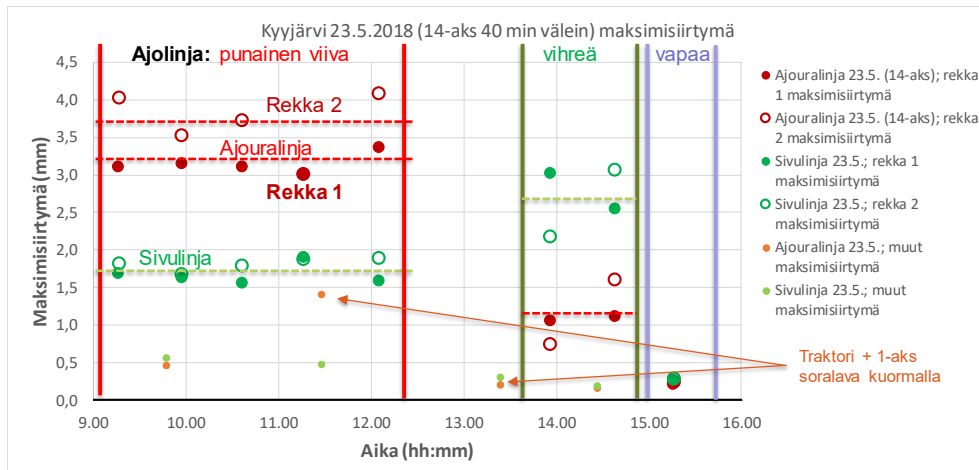
Kuvassa 18 on esitetty eri ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät kummaltakin pystysiirtymäanturilta. Kuormitusajoneuvon ajaessa ensimmäisen kerran anturin yli muodostui tiehen anturin kohdalle suurin pysyvä siirtymä. Muilla ylityksillä pysyvä siirtymä oli selkeästi pienempi. Kuvasta nähdään, että 0,5 m etäisyydellä paripyörärenkaiden keskikohdasta tien pinta kohoaa.



Kuva 18. Kyyjärven kohteella 22.5. mitattujen kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin sivusijaintiin.

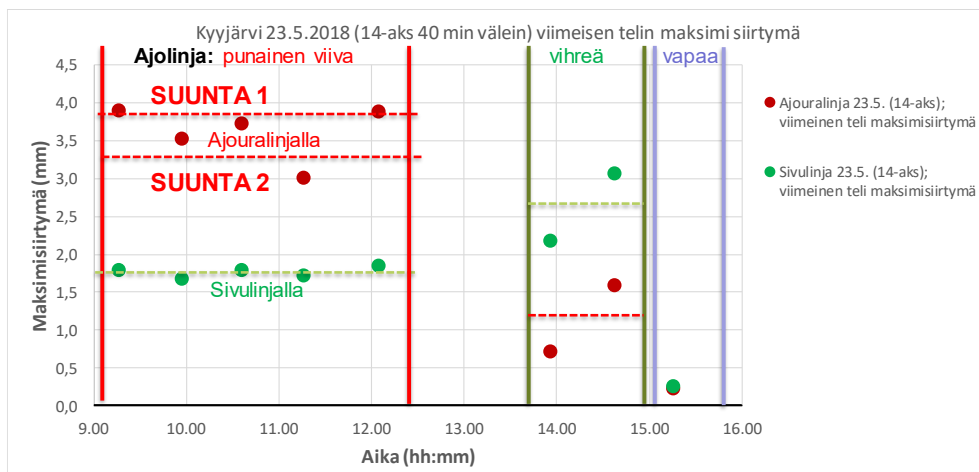
#### 4.2.2.2 Kevät 23.5.2018 – kaksi kuormitusajoneuvoa peräkkäin

Kevään 2018 toisena mittauspäivänä Kyyjärvellä mittausaluetta kuormitti kaksi peräkkäin ajavaa 64 tonnin 7-akselista tukkirekkaa 40 minuutin välein kumpaankin ajosuuntaan. Kuvassa 19 on esitetty kuormitusajoneuvojen ylityksistä 23.5.2018 mitatut päällysteen pystysiirtymät sekä muiden raskaiden ajoneuvojen aiheuttamat maksimisiirtymät. Kuormitusajoneuvojen kulkiessa aamupäivällä ajouralinjaa pitkin ensimmäisenä kulkenut rekka aiheutti ylityksillä noin 3,2 mm maksimisiirtymän ja sen perässä kulkenut rekka pääosin 3,5–4 mm maksimisiirtymän. Ero selittyy sillä, että toisena kulkeneen rekan suurin akselimassa oli noin 10 % suurempi kuin ensimmäisen rekan suurin akselimassa. Sivulinjalla maksimisiirtymät olivat 1,6–1,9 mm. Iltapäivällä kuormitusajoneuvon ajolinjan muuttuessa 0,65 m keskemälle tietä (vihreä viiva eli sivulinja) havaitaan antureista mitattujen arvojen kääntyneen odotetusti päinvastaisiksi, mutta niiden lukemien pienentyneen. Lopuksi ajatulla vapaalla ajolinjalla kuormitusajoneuvot kulkivat keskempänä tietä, jolloin antureilla mitatut siirtymät olivat pieniä. Kuormitusajoneuvojen lisäksi kohteella kulki 23.5.2018 yksi täysi tukkirekka kerran ja kahdesti traktori, jonka yksiakselinen peräkärry oli täynnä soraa. Rekka ohitti etäältä anturit, joten traktorin perävaunun ensimmäisen ylityksen aiheuttama noin 1,4 mm maksimisiirtymä oli suurin muista ajoneuvoista mitattu pystysiirtymä.



Kuva 19. Kyyjärven kohteella 23.5.2018 mitatut maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.

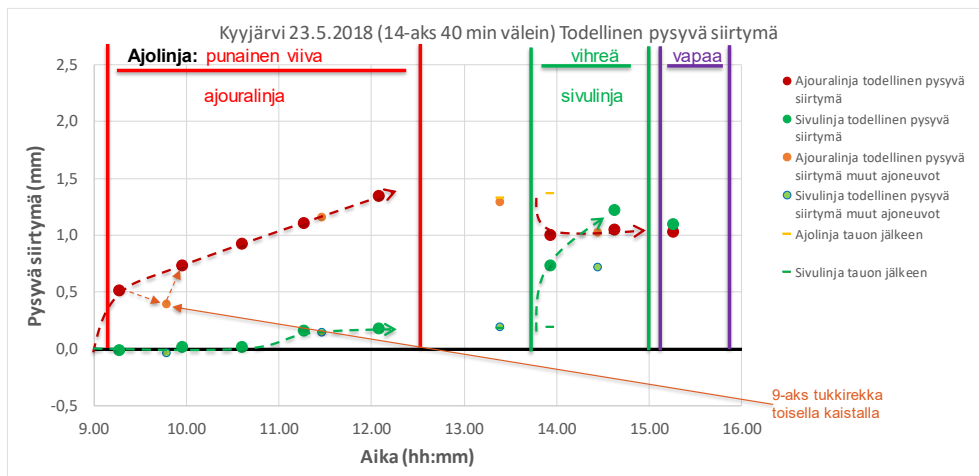
Kuvassa 20 on esitetty kuormitusajoneuvojen viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät samalla tavalla kuin kuvassa 19. Kuvasta 20 nähdään, että ajourassa ajettaessa ajosuunnalla oli vaikutusta viimeisen telin aiheuttamaan maksimisiirtymään. Viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät olivat ajouralla suuntaan 2 ajettaessa pienempiä kuin suuntaan 1 ajettaessa. Kuvien 19 ja 20 perusteella ylityksen viimeisen teli aiheuttamat maksimisiirtymät olivat aamupäivän suurimpia johtuen viimeisellä telillä olevasta suurimmasta teli-massasta. Viimeisen telin akselimassa ja myös viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät olivat suurempia kahden kuormitusajoneuvon kulkiessa peräkkäin 23.5.2018 kuin päivää aiemmin yhden kuormitusajoneuvon päivänä.



Kuva 20. Kyyjärven kohteella 23.5.2018 mitatut kuormitusajoneuvon viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.

Kuvassa 21 on esitetty kuormitusajoneuvojen ja muiden raskaiden ajoneuvojen ylitysten jälkeinen tien pinnan todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä siirtymäantureiden kohdalla. Muut rekat eivät kulkeneet mittaustantureilla varustetulla kaistalla, mutta sorakuormaa vetävä traktori kulki. Kahden 7-akselisen rekan muodostaman 14-akselisen kuormitusajoneuvon kulkiessa aamulla ajouralinjaa (punainen viiva) pitkin tien pinnan pysyvä siirtymä uran kohdalla oli viiden ylityksen jälkeen noin 1,4 mm. Ylitysten määrän kasvaessa pysyvä siirtymä ylitystä kohden vaikutti pysyvän saman suuruksena toisesta

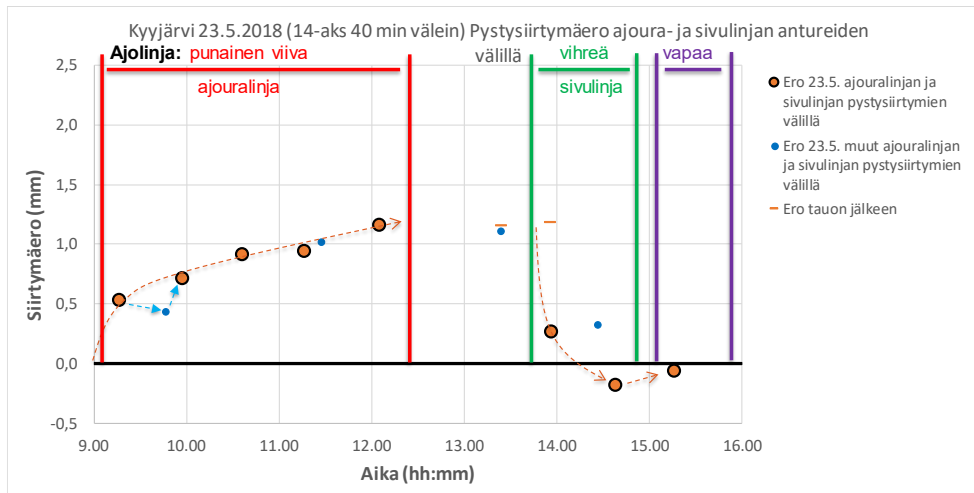
ylityksestä alkaen. Sivulinjalla tien pinnan pysyvä siirtymä oli pieni. Tauon jälkeen sama kuormitusajoneuvoyhdistelmän ylitti mittausalueen kaksi kertaa sivulinjaa (vihreä viiva) pitkin eli se kulki noin 0,65 m keskeemmällä tietä kuin aamulla. Tällöin sivulinjalla tien pinnan pysyvä siirtymä oli huomattavan suuri molemmilla ylityksillä. Ajouran kohdalla tien pinta kohosi ensimmäisellä ylityksellä, mutta ei toisella. Viimeisellä ylityskerralla kuormitusajoneuvo ajoi tien keskellä, jolloin sivulinjan mittauspisteen kohdalla tien pinta kohosi, mutta ajouran mittauspisteen kohdalla tien pintaan ei tullut pysyviä siirtymiä. Muiden ajoneuvojen aiheuttamilla pysyvillä siirtymillä ei näyttänyt olevan merkittävää vaikutusta pitkäaikaiseen pysyvään siirtymään mittauspisteiden kohdalla, vaikka toisella kaistalla ennen kello kymmentä kulkenut 9-akselinen tukkirekka hetkellisesti vaikutti pysyvän siirtymän suuruuteen.



Kuva 21. Kyyjärven kohteella 23.5.2018 ajoneuvojen ylitysten jälkeen pystysiirtymäantureilla mitatut tien pinnan pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalla.

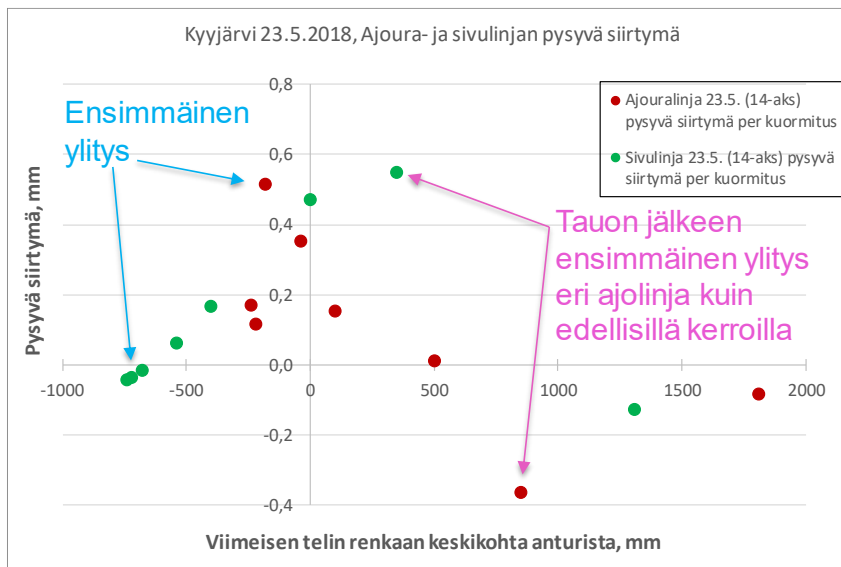
Kuvassa 22 on esitetty kuvan 21 mittaustulokset, kun ajouralinjan pysyvästä siirtymästä on vähennetty sivulinjan pysyvä siirtymä. Tämä erotus voisi kuvata paikallista urasyvyyden kasvua antureiden sijaitessa 0,5 m etäisyydellä toisistaan. Viiden ensimmäisen ylityksen aikana eroa oli tullut noin 1,2 mm, mutta tauon jälkeen eri ajolinjalla tehdyn yhden ylityksen jälkeen se oli enää 0,2 mm ja kahden ylityksen jälkeen urasyvyys näytti pienentyneen aamun alkutilanteeseen nähden 0,1 mm. Viimeisellä ylityksellä kuormitusajoneuvo ajoi keskeemmällä tietä, jolloin tien pinta kohosi edellisen ajonlinjan (sivulinja) kohdalla. Mittauspäivän lopussa mittauspisteiden pysyvien pystysiirtymien välille ei ollut muodostunut eroa, vaikka molempien antureiden kohdalla tien päällyste oli painunut yhden millimetrin. Täten kuormitusajoneuvon ajolinja vaikutti merkittävästi päällysteen pinnan pystysiirtymäantureiden pysyvien siirtymien eron suuruuteen Kyyjärven kohteen ohut-päällysteisellä tiellä, joka sijaitsi turpeisella pohjamaalla.





Kuva 22. Kyyjärven kohteella 23.5. mitattu ajoura- ja sivulinjan antureiden siirtymäero ajoneuvojen ylitysten jälkeen.

Kuvassa 23 on esitetty eri ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureilta. Kuormitusajoneuvon ajaessa ensimmäisen kerran anturin yli muodostui tiehen anturin kohdalle suurin pysyvä siirtymä. Ero ei kuitenkaan ollut yhtä iso kuin edellisellä päivänä.



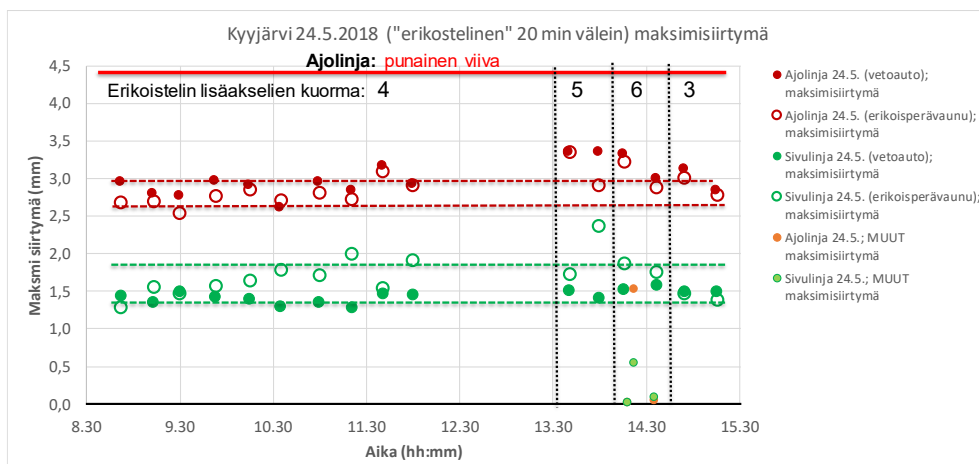
Kuva 23. Kyyjärven kohteella 23.5. mitattujen kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin sivusijaintiin.

#### 4.2.2.3 Kevät 24.5.2018 – yksi erikoisperävaunulla varustettu kuormitusajoneuvo

Kevään 2018 kolmantena ja viimeisenä mittauspäivänä Kyyjärvellä mittausaluetta kuormitti 65 tonnin tukkirekka, jonka perävaunun viimeinen teli oli erikoisrakenteinen. Kolmen tavallisen akselin lisäksi viimeisessä telissä oli kaksi lisäakselia. Lisäakselilla oli perävaunun keskilinjan kohdalla paripyörä, jolle tulevan massan suuruutta voitiin vaihdella 3-6 tonnin välillä. Täten kuormitusajoneuvolla oli kahdeksan tavallista akselia ja kaksi lisäakselia. Kuvassa 24 on esitetty 24.5.2018 kuormitusajoneuvon ylityksistä mitatut päällysteen pystysiirtymät sekä muiden raskaiden ajoneuvojen aiheuttamat maksimisiirtymät.

Kuormitusajoneuvojen kulkiessa aamupäivällä ajouralinjaa pitkin erikoistelin akselien ollessa 4 tonnin perusasetuksella kuormitusajoneuvo aiheutti ylityksillä pääsääntöisesti 2,7–3,0 mm maksimisiirtymän ajouralinjalla. Vetoauton aiheuttama maksimisiirtymä oli hieman suurempi kuin perävaunun aiheuttama maksimisiirtymä. Sivulinjalla kuormitusajoneuvon aiheuttamat maksimisiirtymät olivat vastaavasti pääosin 1,4–1,9 mm. Alussa vetoauton aiheuttama maksimisiirtymä oli suurempi kuin perävaunun, mutta neljänneksen ylityksen jälkeen pienempi. Vetoauton aiheuttama maksimisiirtymä ei kasvanut ylitysten määrän lisääntyessä, mutta perävaunun aiheuttama maksimisiirtymä kasvoi. Tämä saattoi johtua urasyvyyden kasvusta alussa, jonka jälkeen viimeisen telin lisäakselien paripyörien kantaman kuormituksen vaikutus suureni.

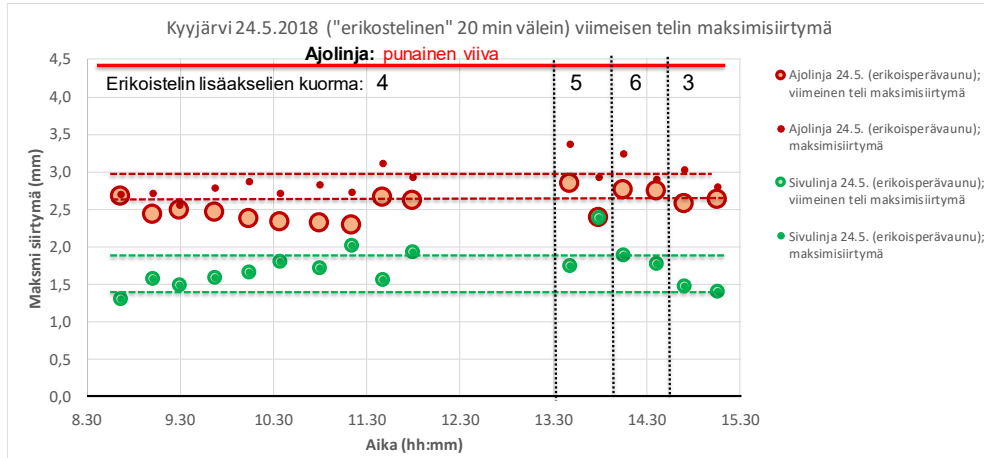
Kuvasta 24 havaitaan, että erikoistelin lisäakselien kuorman kasvaessa tauon jälkeen viiteen ja kuuteen tonniin ajouran maksimisiirtymät kasvavat hieman, mutta pysyvät sivulinjalla aiemmalla tasolla. Pienimmällä lisäakselien kuormalla maksimisiirtymät olivat samaa suuruusluokkaa kuin aamupäivän perusasetuksella.



Kuva 24. Kyyjärven kohteella 24.5.2018 mitatut maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.

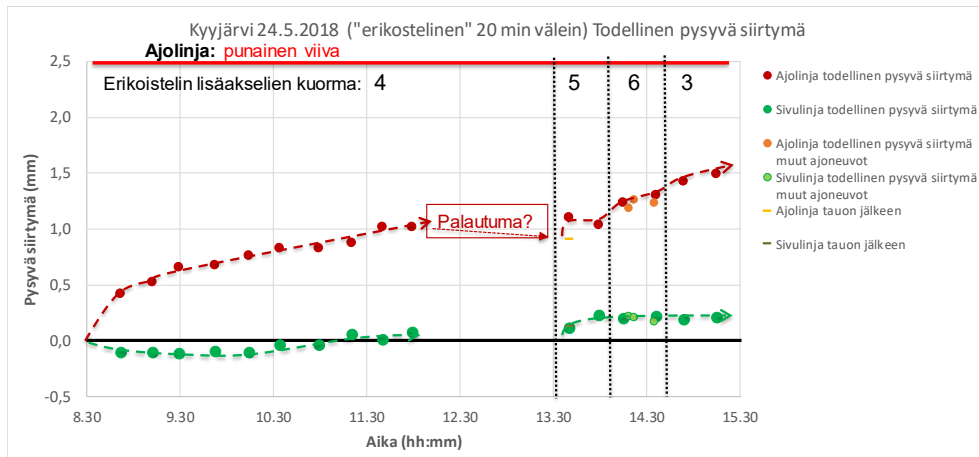
Kuvassa 25 on esitetty kuormitusajoneuvon perävaunun aiheuttamat maksimisiirtymät ja viimeisen eli erikoistelin aiheuttamat maksimisiirtymät. Kuvassa 25 vaakaviivat ovat samalla tasolla kuin kuvassa 24. Kuvasta 25 nähdään, että ajourassa ajettaessa ajouran maksimisiirtymä muodostuu perävaunun ensimmäisestä telistä, koska viimeisen telin maksimisiirtymät ovat sitä pienempiä. Vastaavasti ajourassa ajettaessa sivulinjan kohdan maksimisiirtymä muodostuu perävaunun jälkimmäisestä telistä, koska erikoistelin lisäakselien paripyörät sijaitsevat keskellä teliä.





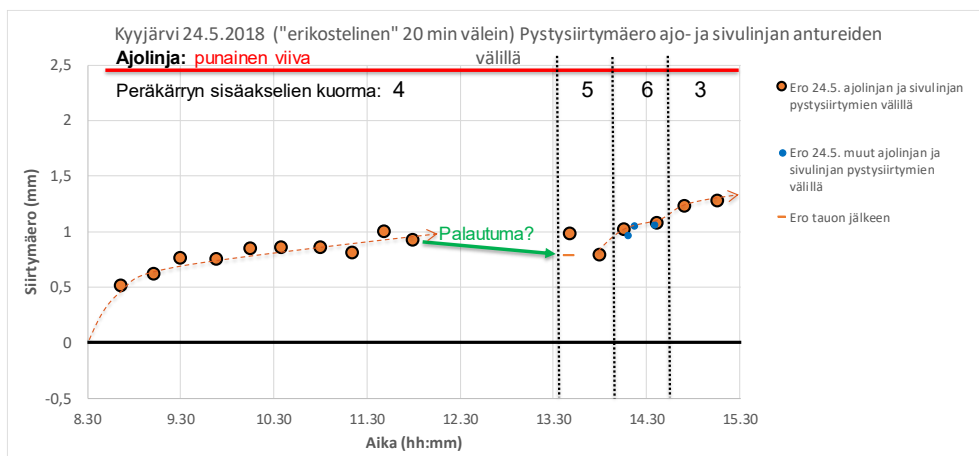
Kuva 25. Kyyjärven kohteella 24.5.2018 mitatut kuormitusajoneuvon viimeisen telin ja perävaunun ensimmäisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.

Viimeisenä kevään 2018 mittauspäivänä ohutpäällysteisellä Kyyjärven mittauskohteella muut raskaimmat ajoneuvot olivat 3-akselinen kuorma-auto, 3-akselinen kuorma-auto tyhjänä ja 2-akselisella peräkärillä varustettu traktori heinäpaalikuormalla. Kuvassa 26 on esitetty kuormitusajoneuvojen ja kolmen edellä mainitun muun ajoneuvon ylitysten jälkeiset tien pinnan todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät siirtymäantureiden kohdilla. Kuormitusajoneuvot kulkivat koko päivän ajouralinjaa (punainen viiva) pitkin. Tien pinnan pysyvä siirtymä uran kohdalla oli aamupäivän kymmenen ylityksen jälkeen 1,0 mm ja pysyvän siirtymän kasvu ylitystä kohden vaikutti olevan samaa suuruusluokkaa toisesta ylityksestä alkaen. Sivulinjalla tien pinnan pysyvä siirtymä oli vähäistä. Tauon jälkeen saman kuormitusajoneuvon perävaunun erikoistelin kuormitusjakautumaa muutettiin kasvattamalla telin keskilinjalla olevien paripyörien kuormaa neljällä ensimmäisellä ylityksellä. Sivulinjalla olevan siirtymäanturin perusteella tienpinnan taso painui aluksi, jonka jälkeen sen taso vakiintui sivulinjalla. Ajouralinjalla tien pinnan taso painui. Kahdella viimeisellä ylityksellä perävaunun viimeisen erikoistelin keskellä olevien paripyörien kuormaa pienennettiin aamupäivän arvoa pienemmäksi. Tällöin ajouralinjalla tien pinta painui, mutta sivulinjalla pysyi aiemmalla tasolla.



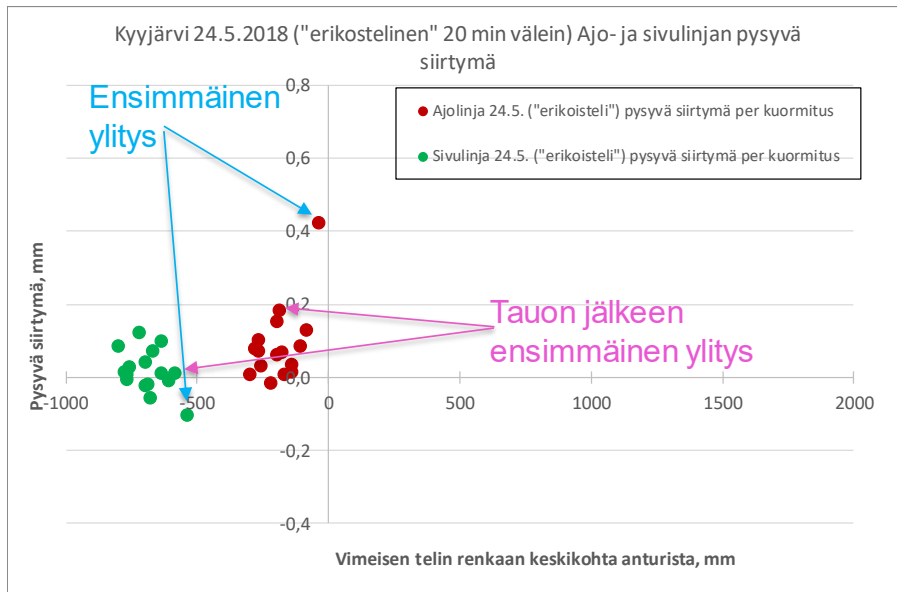
Kuva 26. Kyyjärven kohteella 24.5.2018 ajoneuvon ylitysten jälkeen pystysiirtymäantureilla mitatut tien pinnan pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalla.

Kuvassa 27 on esitetty kuvan 26 mittaukset, kun ajouralinjan pysyvästä siirtymästä on vähennetty sivulinjan pysyvä siirtymä. Tämä erotus voisi kuvata paikallista urasyvyyden kasvua antureiden sijaitessa 0,5 m etäisyydellä toisistaan. Kymmenen ensimmäisen ylityksen aikana eroa oli tullut noin 1,0 mm, mutta tauon jälkeen tehdyillä ylityksillä, kun erikoistelin keskellä olevien paripyörien kuormitusta kasvatettiin, siirtymäantureiden ero pysyi 1 mm suuruusluokassa. Kahdella viimeisellä ylityksellä, kun erikoistelin keskellä olevien paripyörien kuorma asetettiin pienemmäksi aamupäivän ajoihin verrattuna, siirtymäantureiden ero kasvoi eli uran syvyys näytti kasvavan.



Kuva 27. Kyyjärven kohteella 24.5.2018 mitattu ajoura- ja sivulinjan antureiden siirtymäero eri ajoneuvoylitysten jälkeen.

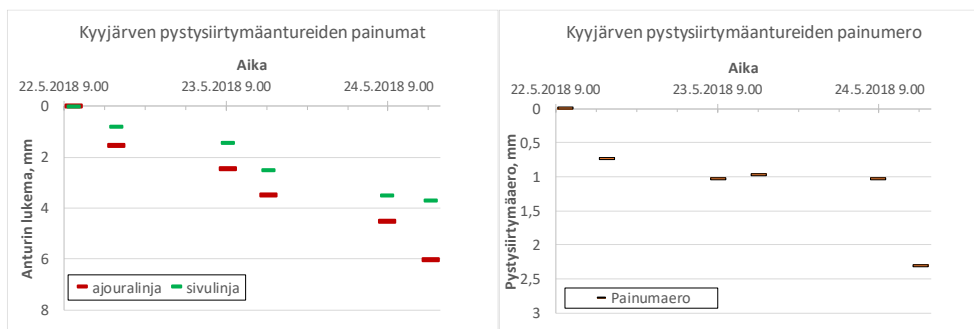
Kuvassa 28 on esitetty eri ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureilta, kun kuormitusajoneuvon perävaunussa oli erikoistelillä varustettu viimeinen teli. Kuormitusajoneuvon ajaessa ensimmäisen kerran ajouralla olevan anturin yli muodostui ajouralla päivän suurin pysyvä siirtymä. Ero ei ollut kuitenkaan yhtä iso kuin edellisenä päivänä. Tauon jälkeen iltapäivällä ajettiin samaa ajouralinjaa kuin aamulla ja pystysiirtymäantureista mitatut tienpinnan pysyvät siirtymät olivat iltapäivällä samaa suuruusluokkaa kuin aamulla.



Kuva 28. Kyyjärven kohteella 24.5.2018 mitatun kuormitusajoneuvon ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin sivusijaintiin.

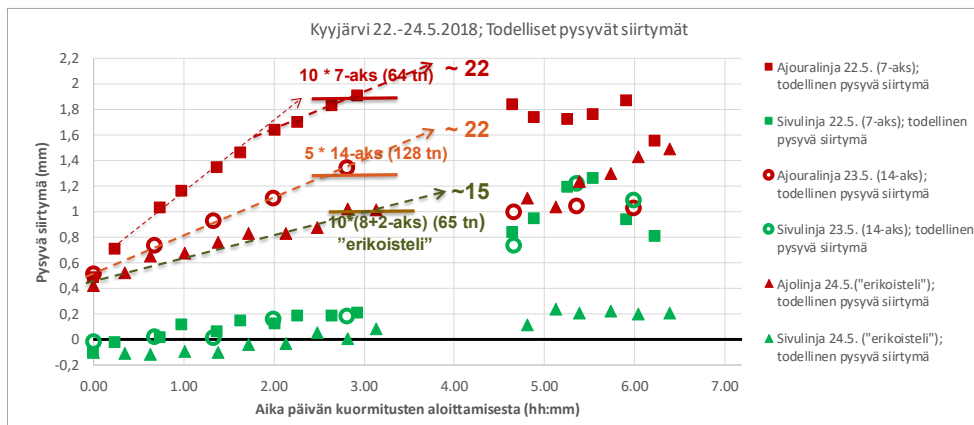
#### 4.2.2.4 Yhteenveto kevään 2018 pystysiirtymämittauksista Kyyjärvellä

Keväällä 2018 roudan sulamisen jälkeen tehtyjen kuormituskokeiden aikana turpeisella pohjamaalla sijaitseva 30–40 mm paksuisella päällysteellä oleva vähäliikenteinen tie ja pohjamaa tiivistyivät raskaiden kuormitusajoneuvojen vaikutuksesta. Kuvassa 29 on esitetty ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureista mitatut pysyvät siirtymät mittauspäivittäin ennen ensimmäistä mittausta ja päivän viimeisen mittauksen jälkeen sekä niiden ero. Kolmen päivän aikana päällysteen taso painui ajouralinjalla 6 mm ja sivulinjalla alle 4 mm. Kuvista havaitaan, että molemmissa mittauspisteissä päällysteen pinnan taso painui sekä mittauspäivinä että niiden välisinä öinä. Painumaero ajoura- ja sivulinjan välillä kasvoi tai muuttui lähinnä mittausten aikana riippuen kuormitusajoneuvojen ajolinjoista. Täten voi olettaa päivän kuormitusten tiivistävän tierakennetta ja pohjamaata vielä yön aikana yhdessä erittäin lämpimän ja kuivan kelin pohjamaata kuivattavan vaikutuksen kanssa. Täten Kyyjärven kohteelta keväällä 2018 eri päivinä saatujen mittaustulosten vertailuun on suhtauduttava erittäin suurella varauksella.



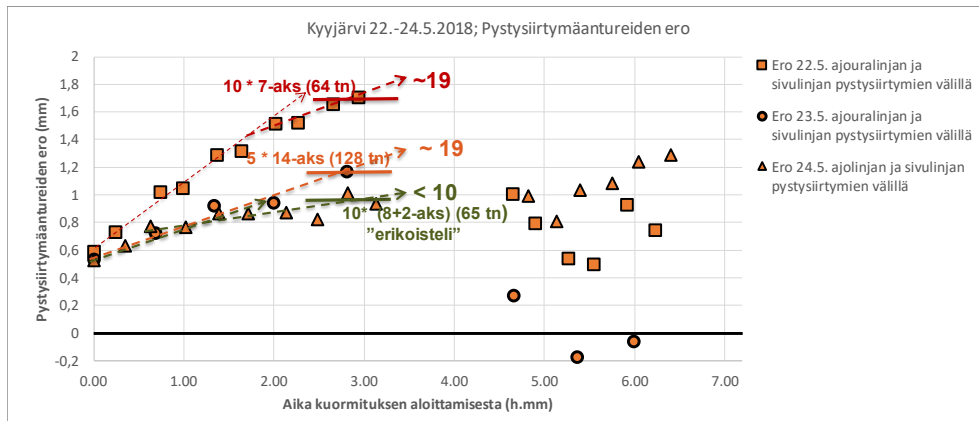
Kuva 29. Keväällä 2018 Kyyjärven koekohteen ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureista mitatut tien päällysteen painumat vasemmalla ja oikealla niiden ero.

Kuvassa 30 on yhdistetty samaan kuvaan eri mittauspäivien pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalta ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen kyseisenä mittauspäivänä. Verrattaessa ajouralinjan pysyviä siirtymiä aamupäivän osalta havaitaan, että ensimmäisen ylityksen jälkeen pysyvän siirtymän kasvu oli melkein lineaarista kahtena viimeisenä mittauspäivänä ja ensimmäisenä mittauspäivänä pysyvä siirtymä ylitystä kohden todennäköisesti vakiintui kuuden ensimmäisen ylityksen jälkeen. Kun piirretään aamupäivän neljästä viimeisestä ylityksestä lineaarinen pysyvän siirtymän kasvu ajan suhteen, havaitaan sillä olevan sama kulmakerroin kuin seuraavana päivänä pysyvän pystysiirtymän kasvulla ensimmäisen ylityksen jälkeen. Kun ensimmäisenä ja toisena päivänä mittauskohteen yli kulkee samassa ajassa sama massa yhtä monella akselilla, näyttäisivät ensimmäisen päivän 7-akseliset kuormitusajoneuvot aiheuttavan lopulta samaa suuruusluokkaa olevan pysyvän siirtymän kuin kaksi peräkkäin ajavaa 7-akselista kuormitusajoneuvoa. Kolmantena päivänä kuormitusajoneuvon perävaunun viimeisen telin ollessa erikoisvalmisteinen vastaava kulmakerroin oli pienempi kuin kahtena edellisenä päivänä.



Kuva 30. Kyyjärven kohteen kevään 2018 mittauspäivinä mitatut pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalta ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen

Kuvassa 31 on yhdistetty samaan kuvaan mittauspäivinä ajoura- ja sivulinjalta mitattujen pysyvien siirtymien ero ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen kyseisenä mittauspäivänä. Verratessa ajouralinjan pysyviä siirtymiä aamupäivän osalta havaitaan, että ensimmäisen ylityksen jälkeen pysyvän siirtymän kasvu ylitystä kohti oli melkein lineaarista kahtena viimeisenä mittauspäivänä ja ensimmäisenä mittauspäivänä pysyvä siirtymä todennäköisesti vakiintui kuuden ensimmäisen ylityksen jälkeen. Kun piirretään aamupäivän neljästä viimeisestä ylityksestä lineaarinen pysyvän siirtymän kasvu ajan suhteen, havaitaan sillä olevan sama kulmakerroin kuin seuraavana päivänä pysyvän pystysiirtymän kasvulla ensimmäisen ylityksen jälkeen. Kun ensimmäisenä ja toisena päivänä mittauskohteen yli kulkee samassa ajassa sama massa yhtä monella akselilla, näyttäisivät ensimmäisen päivän 7-akseliset kuormitusajoneuvot aiheuttavan lopulta samaa suuruusluokkaa olevan pysyvän siirtymän kuin kaksi peräkkäin ajavaa 7-akselista kuormitusajoneuvoa. Kolmantena päivänä kuormitusajoneuvon perävaunun viimeisen telin ollessa erikoisvalmisteinen vastaava kulmakerroin vaikutti aluksi olevan sama kuin edellisenä päivän, mutta muutaman ylityksen jälkeen olevan pienempi kuin kahtena edellisenä päivänä.



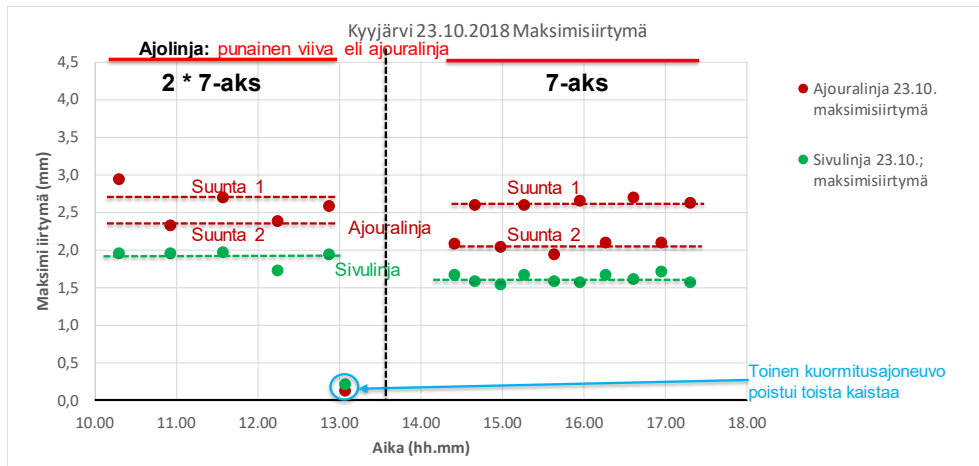
Kuva 31. Kyyjärven kohteen kevään 2018 mittauspäivinä ajoura- ja sivulinjalta mitattujen pysyvien siirtymien ero ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen kyseisenä mittauspäivänä.

Kyyjärven kohteelta keväällä 2018 eri päivinä saatujen mittaus tulosten vertailuun on suhtauduttava erittäin suurella varauksella, koska mittauspäivien aikana tien pinta painui eli tierakenne ja pohjamaa tiivistyivät parantaen tierakenteen kestävyttä. Tämän lisäksi yli 20 °C lämpötilat sateettomana keväänä paransivat osaltaan tierakenteen kestävyttä.

#### 4.2.2.5 Syksy 23.10.2018

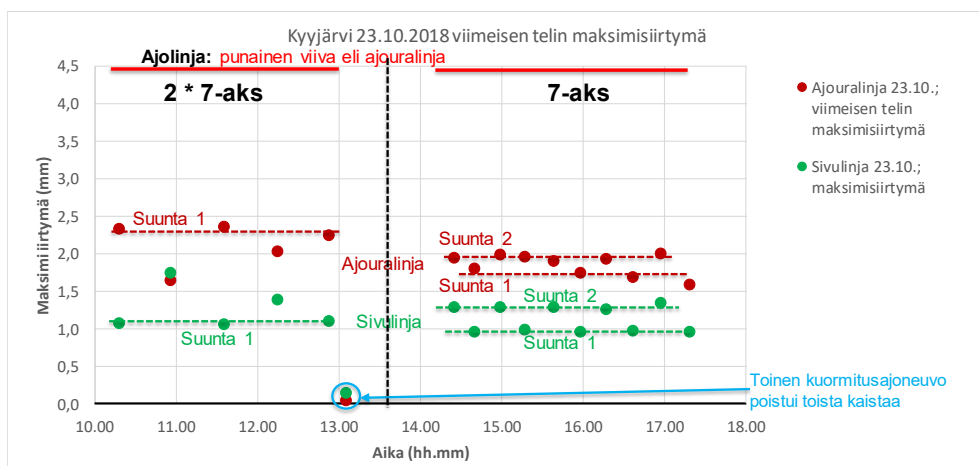
Syksyllä 2018 Kyyjärven kohteen 30–40 mm ohuella päällysteellä olevan noin 0,6 m paksuisen tierakenteen rasittumista testattiin ajattamalla kuormitusajoneuvoja ajouralinjaa pitkin kahtena päivänä. Kohteen pohjamaa oli turvetta. Ensimmäisen aamupäivän aikana kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi peräkkäin viisi kertaa mittausalueen yli ja 1,5 tunnin tauon jälkeen iltapäivällä yksi 7-akselinen kuormitusajoneuvo ylitti mittauskohteen kymmenen kertaa. Seuraavana päivänä kuormitusten järjestys oli päinvastainen.

Kuvassa 32 on esitetty kuormitusajoneuvojen ylityksistä 23.10.2018 mitatut ajoura- ja sivulinjan maksimisiirtymät Kyyjärven kohteelta. Ajouralla suuntaan 1 ajettaessa maksimisiirtymät olivat suurempia kuin suuntaan 2 ajettaessa. Kohteen ajosuunnat näkyvät kuvassa 13. Sivulinjalla ajosuunnalla ei ollut merkitystä maksimisiirtymän suuruuteen. Aamupäivällä kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajaessa peräkkäin maksimisiirtymät olivat suurempia kuin iltapäivällä yhden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ylityksillä. Tämä ero johtui siitä, että 10 tn yksittäisen akselimassan omaava ajoneuvo poistui aamupäivän jälkeen ja iltapäivän kuormitusajoneuvon suurin yksittäinen akselimassa oli 9 tn. Ajouran maksimisiirtymä oli aamupäivällä suuntaan 1 keskimäärin 2,7 mm ja suuntaan 2 noin 2,4 mm. Iltapäivällä maksimisiirtymät olivat vastaavasti suuntaan 1 noin 2,6 mm ja suuntaan 2 noin 2,0 mm. Sivulinjan maksimisiirtymä ylityksellä oli noin 2,0 mm aamupäivällä ja 1,6 mm iltapäivällä.



Kuva 32. Kyyjärven kohteella 23.10.2018 mitatut maksimisiirtymät ajouralinjalta ja sivulinjalta.

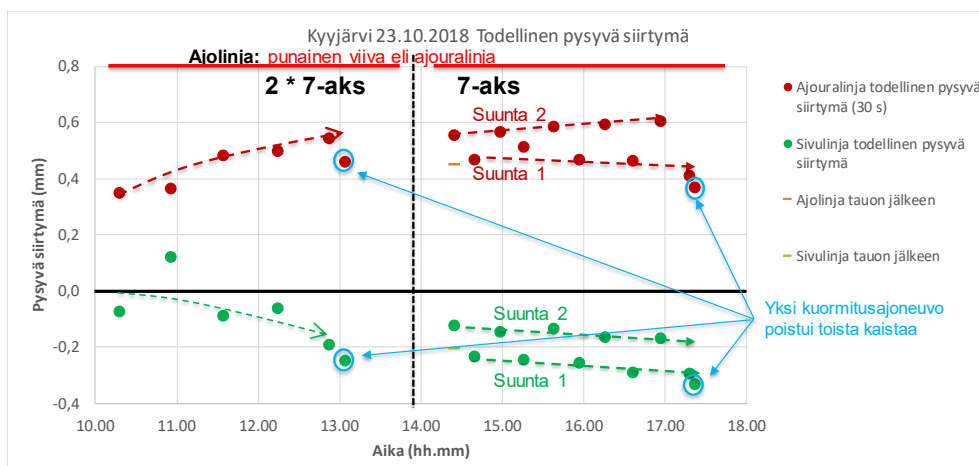
Kuormitusajoneuvojen viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät on esitetty kuvassa 33. Viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät olivat selkeästi pienempiä kuin kuormitusajoneuvojen aiheuttamat maksimisiirtymät kullakin ylityksellä. Koska aamupäivän kuormitusajoneuvoista jälkimmäinen jäi kohteelle myös iltapäiväksi, viimeisen telin massa oli sama koko päivän. Aamupäivällä viimeisen telin aiheuttama maksimisiirtymä ajouralla oli suuntaan 1 ajettaessa noin 2,3 mm ja suuntaan 2 ajettaessa keskimäärin 1,8 mm sekä iltapäivällä suuntaan 1 kuljettaessa keskimäärin 1,7 mm ja suuntaan 2 noin 2,0 mm. Vastaa- vasti sivulinjalla 0,5 m keskemällä tietä ajouran anturista maksimisiirtymä oli suuntaan 1 ajettaessa 1,1 mm ja suuntaan 2 keskimäärin 1,6 mm sekä iltapäivällä suuntaan 1 kuljettaessa lähes 1,0 mm ja suuntaan 2 noin 1,3 mm. Aamupäivällä suuntaan 1 kuljettaessa viimeisen telin aiheuttama maksimisiirtymä ajouralla oli suurempi kuin iltapäivällä. Kun verrataan kuvia 32 ja 33 iltapäivän osalta, havaitaan kuormitusajoneuvojen maksimisiirtymien olleen suurempia suuntaan 1 ajettaessa, mutta kuormitusajoneuvon viimeisen telin maksimisiirtymät olivat suurempia suuntaan 2 ajettaessa.



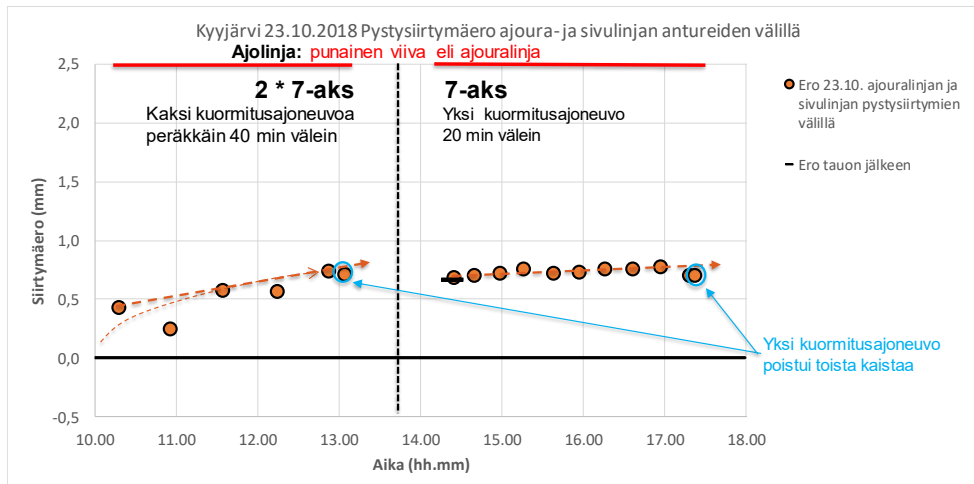
Kuva 33. Kyyjärven kohteella 23.10.2018 mitattujen kuormitusajoneuvojen viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.

Kuvassa 34 on esitetty pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalla kuormitusajoneuvojen ylitysten jälkeen 23.10.2018 Kyyjärven kohteella. Aamupäivällä kaksi peräkkäin kulkenutta 7-akselista kuormitusajoneuvoa kasvatti ajouran pysyvää siirtymää ja pienensi sivulinjan pysyvää siirtymää. Ensimmäisellä ylityksellä mitattiin ajouralinjalta päivän suurin pysyvän siirtymän muutos. Toisella ylityksellä kuormitusajoneuvon ajolinja erosi eniten muista, minkä jälkeen pysyvän siirtymän kasvu vaikutti vakiintuvan. Aamupäivän kuormitusten jälkeen suuremman kokonaismassan omaava kuormitusajoneuvo poistui mahdollisimman etäältä mittausalueesta toista kaistaa ajaen 12 minuuttia aamupäivän viimeisen kuormituksen jälkeen. Tauon jälkeen yhden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ylityksillä ajouran pysyvä siirtymä kasvoi suuntaan 2 ajettaessa ja pieneni suuntaan 1 ajettaessa. Ylitysten lukumäärän kasvaessa vaikutti siltä, että keskimääräinen ajouran pysyvä siirtymä ei kasva, mutta yhden ylityksen aiheuttama pysyvä siirtymä kasvaa. Iltaapäivällä sivulinjan pysyvä siirtymä pieneni tarkoittaen kyseissä kohdassa tien päällysteen kohoamista. Pienenemä oli lineaarista, kun otetaan huomioon kuormitusajoneuvon ajosuunta.

Kuvassa 35 on esitetty kuvan 34 mittaustulokset, kun ajouralinjan pysyvästä siirtymästä on vähennetty sivulinjan pysyvä siirtymä. Tämä erotus voisi kuvata paikallista urasyvyyden kasvua antureiden sijaitessa 0,5 m etäisyydellä toisistaan. Aamupäivällä kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi peräkkäin 40 minuutin välein ja ensimmäisen ylityksen jälkeen pystysiirtymien ero vaikutti kasvavan melko lineaarisesti. Iltaapäivällä 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajaessa 20 minuutin välein mittausalueen yli pystysiirtymäanturien ero kasvoi lineaarisesti, mutta selkeästi hitaammin kuin aamupäivällä. Tauon aikana siirtymäero oli hieman pienentynyt.

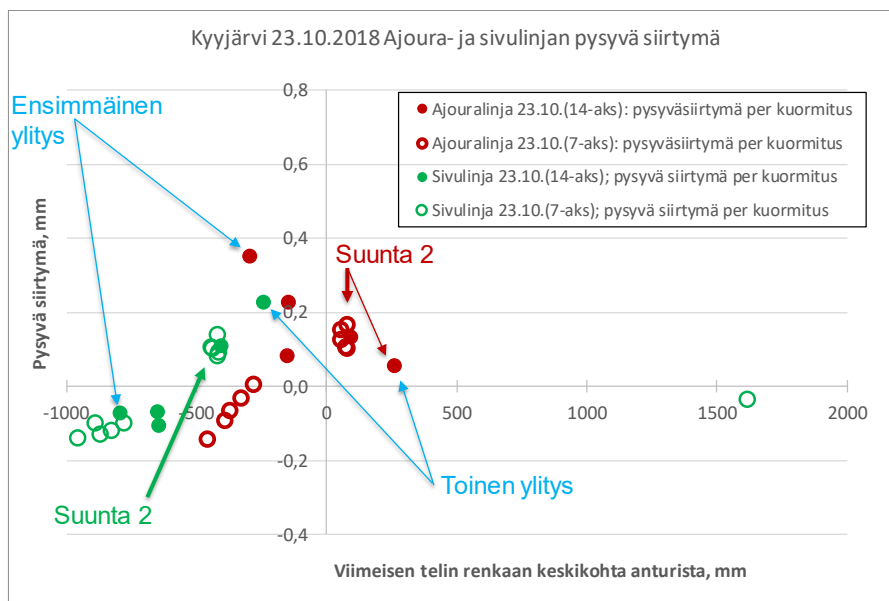


Kuva 34. Kyyjärven kohteella 23.10.2018 ajoneuvon ylitysten jälkeen pystysiirtymäantureilla mitatut tien pinnan pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalla.



Kuva 35. Kyyjärven kohteella 23.10.2018 ajoura- ja sivulinjan antureiden siirtymäero ajoneuvojen ylitysten jälkeen.

Kuvassa 36 on esitetty eri ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureilta suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Kuvasta havaitaan ensimmäisen ja toisen ylityksen viimeisen telin poikenneen eniten muista ylityksistä. Ensimmäisellä ylityksellä ajouralla muodostui päivän suurin pysyvä siirtymä. Kuvasta havaitaan suuntaan 2 ajettaessa viimeisen telin kulkeneen ensimmäistä kertaa lukuun ottamatta hyvin tarkasti samasta kohdasta ja suuntaan 1 ajettaessa vaihtelun olleen suurempaa. Suuntaan 2 kuormitusajoneuvo tuli mittauspisteeseen suoraa ajolinjaa pitkin ajaen vastaan tulevien kaistalla. Suuntaan 1 ajettaessa kuormitusajoneuvo tuli mittauspisteeseen kaarteesta kuormitusajoneuvojen kulkiessa omaa kaistaa pitkin. Viimeisen telin samaan kohtaan osumiseen on saattanut vaikuttaa myös se, että suuntaan 2 vastaantulijoiden kaistaa ajettaessa halutun ajolinjan ohjausviiva oli suoraan kuljettajan alapuolella, jolloin siihen tähtääminen lienee ollut hieman helpompaa.



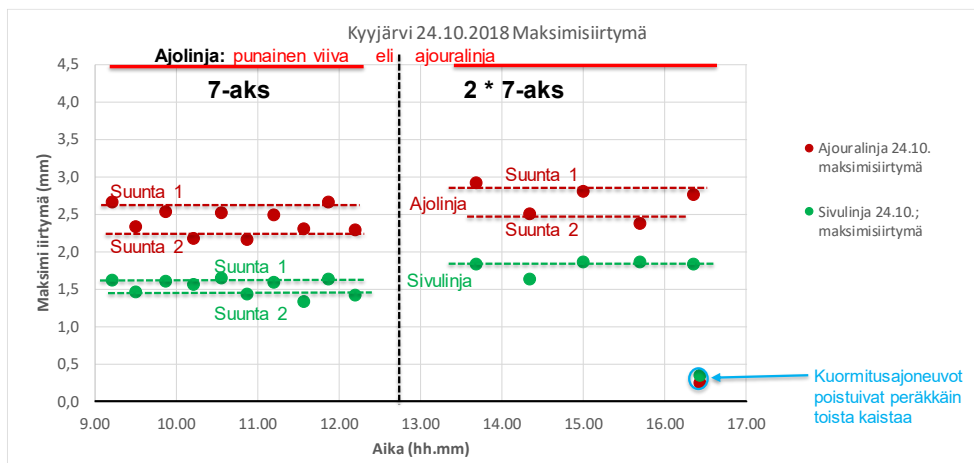
Kuva 36. Kyyjärven kohteella 23.10.2018 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin sivasijaintiin.



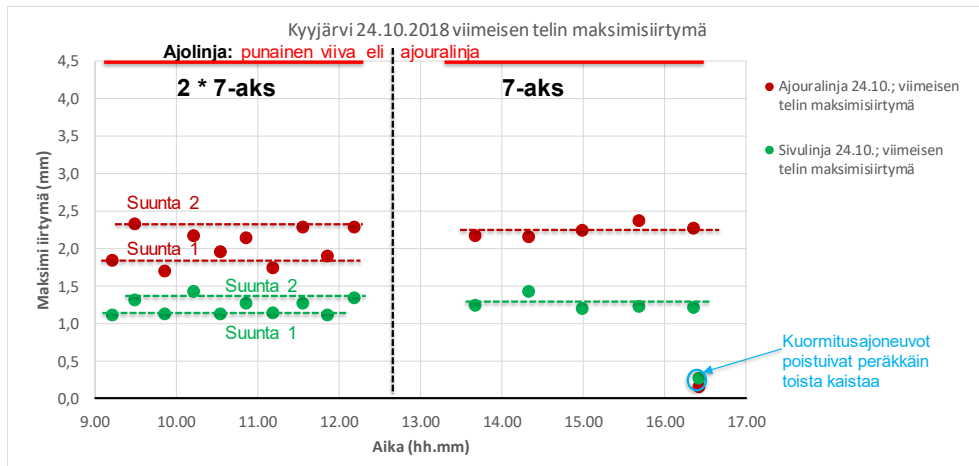
#### 4.2.2.6 Syksy 24.10.2018

Kuvassa 37 on esitetty kuormitusajoneuvojen ylityksistä mitatut ajoura- ja sivulinjan maksimisiirtymät 24.10.2018 Kyyjärven kohteella. Ajouralla suuntaan 1 (kuva 13) ajettaessa maksimisiirtymät olivat suurempia kuin suuntaan 2 ajettaessa. Sivulinjan maksimisiirtymän suuruuteen ajosuunnalla oli pieni vaikutus aamupäivällä. Aamupäivällä yhden 7-akselisen kuormitusajoneuvon aiheuttamat maksimisiirtymät olivat pienempiä kuin iltapäivällä kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajaessa peräkkäin. Tämä ero johtuu siitä, että aamupäivällä suurin yksittäinen akselipaino oli 9 tn ja iltapäivällä 10 tn. Ajouran maksimisiirtymä oli aamupäivällä suuntaan 1 keskimäärin 2,6 mm ja suuntaan 2 noin 2,2 mm ja iltapäivällä vastaavasti suuntaan 1 noin 2,8 mm ja suuntaan 2 noin 2,0 mm ylityksellä. Sivulinjan maksimisiirtymä ylityksellä oli noin 1,6 mm aamupäivällä ja 1,8 mm iltapäivällä.

Kuormitusajoneuvojen viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät on esitetty kuvassa 38. Ylityksellä viimeisen telin aiheuttama maksimisiirtymä oli selkeästi pienempi kuin koko kuormitusajoneuvon aiheuttama maksimisiirtymä. Koska aamupäivän kuormitusajoneuvo ajoi iltapäivällä jälkimmäisenä kuormitusajoneuvona, viimeisen telin massa oli sama koko päivän. Aamupäivällä viimeisen telin aiheuttama maksimisiirtymä ajouralla oli suuntaan 1 ajettaessa noin 2,3 mm ja suuntaan 2 ajettaessa keskimäärin 1,8 mm sekä iltapäivällä keskimäärin 1,7 mm. Vastaavasti 0,5 m keskemällä tietä sivulinjan anturin maksimisiirtymä oli aamupäivällä suuntaan 1 ajettaessa 1,1 mm ja suuntaan 2 keskimäärin 1,4 mm sekä iltapäivällä keskimäärin 1,3 mm. Iltapäivällä viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät ajouralla olivat saman suuruisia kuin aamupäivällä suuntaan 1 kuljettaessa. Kun verrataan kuvia 37 ja 38 aamupäivän osalta, havaitaan kuormitusajoneuvojen maksimisiirtymien olleen suurempia suuntaan 1 ajettaessa, mutta kuormitusajoneuvon viimeisen telin maksimisiirtymät olivat suurempia suuntaan 2 ajettaessa, kuten oli ollut myös edellisenä iltapäivänä.

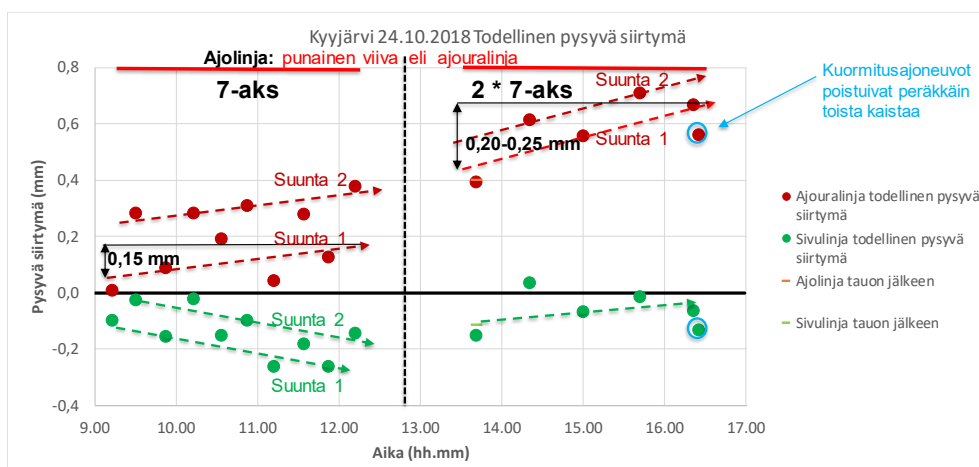


Kuva 37. Kyyjärven kohteella 24.10.2018 mitatut maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.



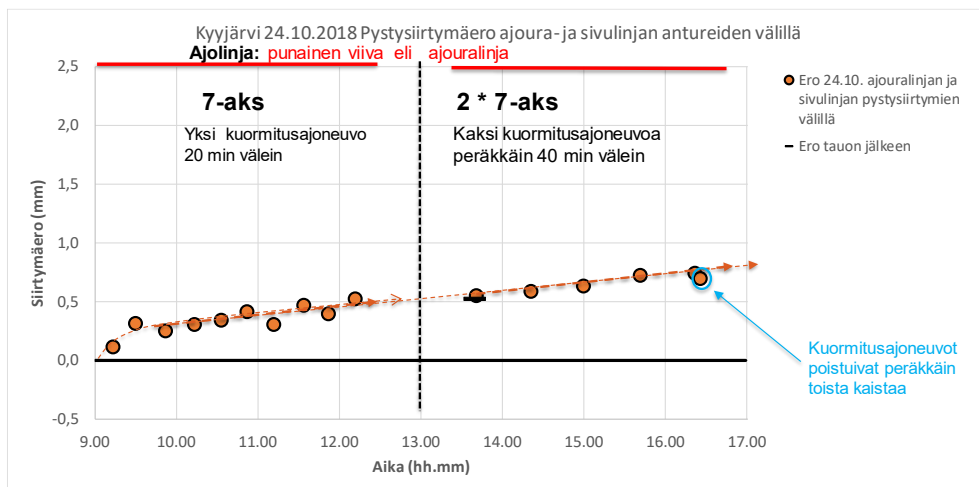
Kuva 38. Kyyjärven kohteella 24.10.2018 mitatut kuormitusajoneuvon viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät ajoura- ja sivulinjalta.

Kuvassa 39 on esitetty pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalla kuormitusajoneuvojen ylitysten jälkeen 24.10.2018 Kyyjärven kohteella. Aamupäivällä 7-akselisen kuormitusajoneuvon ylityksillä ajouran pysyvä siirtymä kasvoi suuntaan 2 ajettaessa ja pieneni suuntaan 1 ajettaessa. Keskimäärin 7-akselinen kuormitusajoneuvo kuitenkin kasvatti ajouran pysyvää siirtymää. Vastaavasti 0,5 m keskemällä tietä ajouralinjan anturiin verrattuna 7-akselisen kuormitusajoneuvon ylitys kasvatti sivulinjan pysyvää siirtymää suuntaan 2 ajettaessa ja pienensi suuntaan 1 ajettaessa. Sivulinjalla pysyvä siirtymä keskimäärin pieneni eli päällysteen pinta kohosi aamupäivällä tehtyjen kuormitusten aikana. Iltaapäivällä toiseksi kuormitusajoneuvoksi tulleen rekan kokonaismassa oli suurempi kuin aamupäivän kuormitusajoneuvon. Tauon jälkeen kahden peräkkäin ajaneen 7-akselisen kuormitusajoneuvon ylityksillä ajouran pysyvä siirtymä kasvoi suuntaan 2 ajettaessa ja pieneni suuntaan 1 ajettaessa, kuten oli tapahtunut aamupäivällä, mutta ajouralle muodostuva keskimääräinen pysyvä siirtymä kasvoi ajan suhteen nopeammin kuin aamupäivällä. Iltaapäivällä sivulinjan kohdalla pysyvä siirtymä keskimäärin kasvoi eli tien pinnan taso painui myös 0,5 m etäisyydellä ajouralinjan anturista.



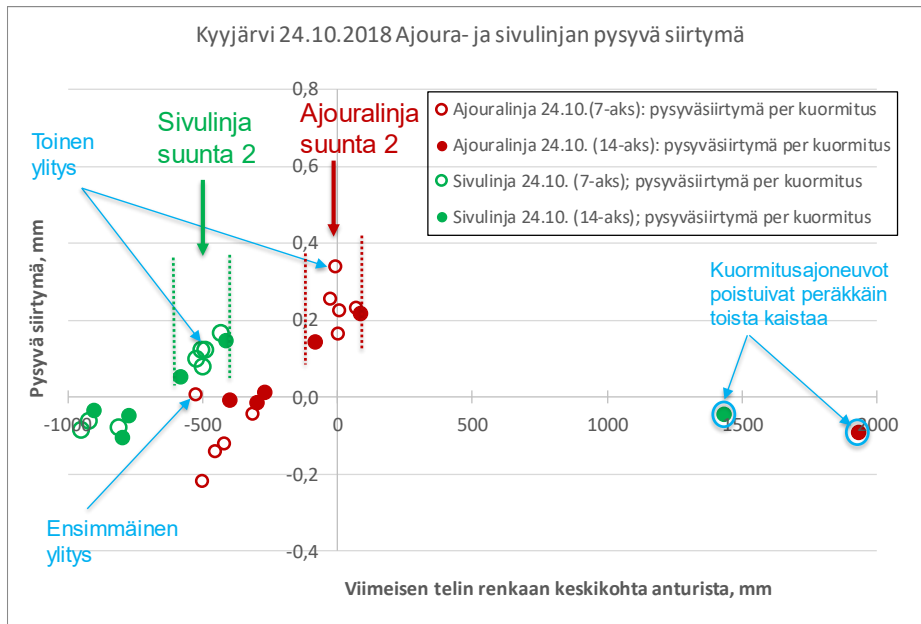
Kuva 39. Kyyjärven kohteella 24.10.2018 ajoneuvon ylitysten jälkeen pystysiirtymäantureilla mitatut tien pinnan pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalla.

Kuvassa 40 on esitetty kuvan 39 mittaustulokset, kun ajouralinjan pysyvästä siirtymästä on vähennetty sivulinjan pysyvä siirtymä. Tämä erotus voisi kuvata paikallista urasyvyyden kasvua antureiden sijaitessa 0,5 m etäisyydellä toisistaan. Aamupäivällä 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajaessa 20 minuutin välein mittausalueen yli pystysiirtymien ero kasvoi lineaarisesti kahden ensimmäisen ylityksen jälkeen. Iltapäivällä kaksi 7-akselista kuormitusajoneuvoa ajoi peräkkäin 40 minuutin välein ja pystysiirtymien ero vaikutti kasvavan melko lineaarisesti. Silmämääräisesti kuvasta 40 katsottaessa siirtymäantureiden eron kasvu näyttää ajan suhteen yhtä suurelta aamu- ja iltapäivällä. Tauon aikana siirtymäero oli hieman pienentynyt, mutta vähemmän kuin edellisenä päivänä 23.10.2018.



Kuva 40. Kyyjärven kohteella 24.10.2018 ajoura- ja sivulinjan antureiden siirtymäero ajoneuvon ylitysten jälkeen.

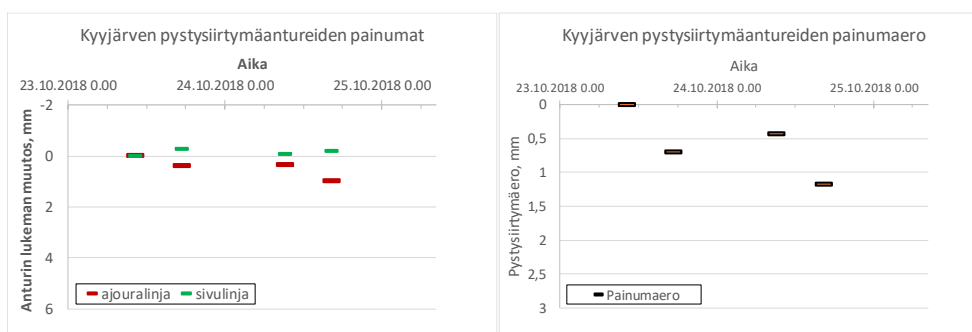
Kuvassa 41 on esitetty yhden ylityksen aiheuttamat pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäanturilta suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Kuvasta havaitaan ensimmäisen ja toisen ylityksen viimeisen telin poikenneen eniten muista ylityksistä. Toisella ylityksellä suuntaan 2 ajettaessa ajouralla muodostui suurin yhden ylityksen aiheuttama pysyvä siirtymä. Kuvasta havaitaan suuntaan 2 ajettaessa viimeisen telin kulkeneen suhteellisen tarkasti samasta kohdasta ja suuntaan 1 ajettaessa vaihtelun olleen suurempaa, mutta pienempää kuin edellisenä päivänä.



Kuva 41. Kyyjärven kohteella 24.10.2018 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin sivusijaintiin.

#### 4.2.2.7 Yhteenveto syksyn 2018 pystysiirtymämittauksista Kyyjärvellä

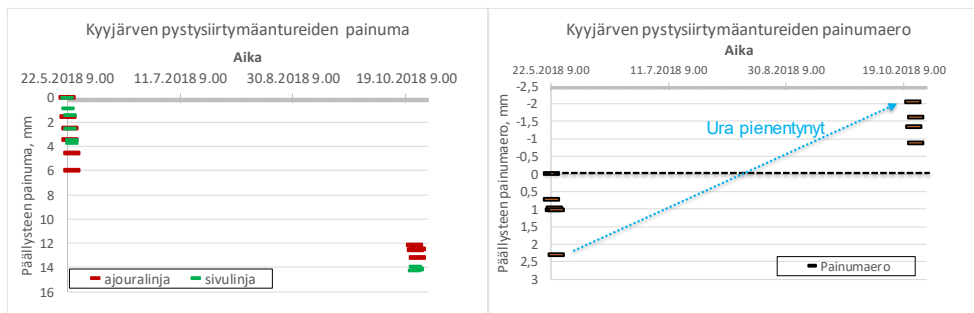
Syksyllä 2018 turpeisella pohjamaalla sijaitseva 30–40 mm paksuisella päällysteellä oleva vähäliikenteinen tie ja pohjamaa eivät juurikaan tiivistyneet raskaiden kuormitusajoneuvojen vaikutuksesta. Kuvassa 42 on esitetty ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureista mitatut pysyvät siirtymät päivittäin ennen ensimmäistä mittausta ja päivän viimeisen mittauksen jälkeen sekä niiden ero. Kahden päivän aikana tien päällysteen pinnan taso painui ajouralinjalla 1 mm ja sivulinjalla kohosi hieman. Kuvista havaitaan, että mittauspäivien välisenä yönä kuormituspäivän aikana syntyneet siirtymät olivat hieman palautuneet. Painumaero ajoura- ja sivulinjan välillä kasvoi kumpanakin mittauspäivänä saman verran.



Kuva 42. Syksyllä 2018 Kyyjärven koekohteen ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureista mitatut tien päällysteen painumat vasemmalla ja oikealla niiden ero.

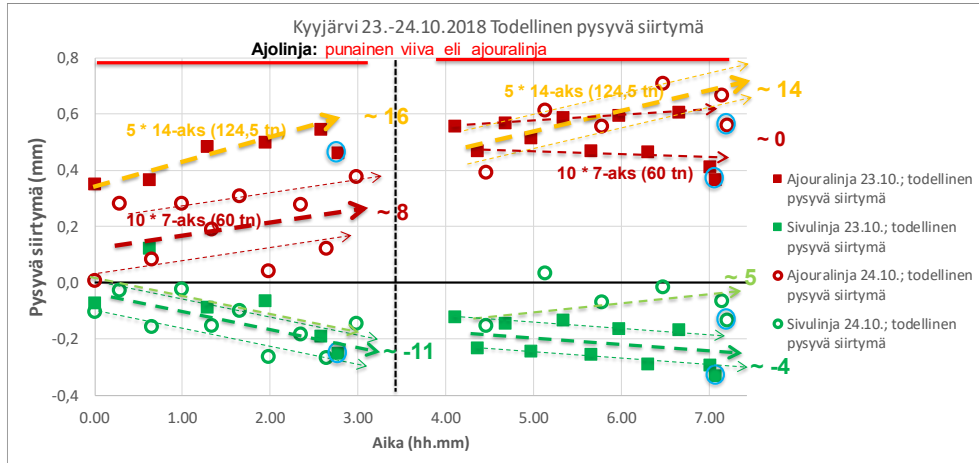
Kuvassa 43 on esitetty Kyyjärven kohteen pystysiirtymäantureista mitatut tien pinnan pystysiirtymien muutokset kevään ensimmäisestä mittauspäivästä. Kolmena toukokuun mittauspäivänä tien pinta painui keskimäärin 5 mm ja sen jälkeen viidessä kuukaudessa vielä noin 7 mm. Mielenkiintoista on havaita, että kevään ja syksyn mittauksen välisenä aikana päällysteen pinnan korkeusero eli urasyvyys oli pienentynyt yli 4 mm.

Kuvassa 44 on yhdistetty samaan kuvaan syksyn mittauspäivinä mitatut pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalta ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen kyseisenä mittauspäivänä. Kuvasta havaitaan ajouralinjan pysyvien siirtymien kasvavan ajan suhteen nopeammin kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajaessa peräkkäin kuin vastaavan massan kulkiessa samassa ajassa 20 minuutein välein 7-akselisen kuormitusajoneuvolla. Aamupäivällä sivulinjalla tien pinta kohosi kummallakin kuormitustavalla saman suuruisesti. Iltapäivällä ajettaessa kahdella 7-akselisella kuormitusajoneuvolla peräkkäin tien päällyste painui sivulinjalla, mutta kohosi yhden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajaessa yli.



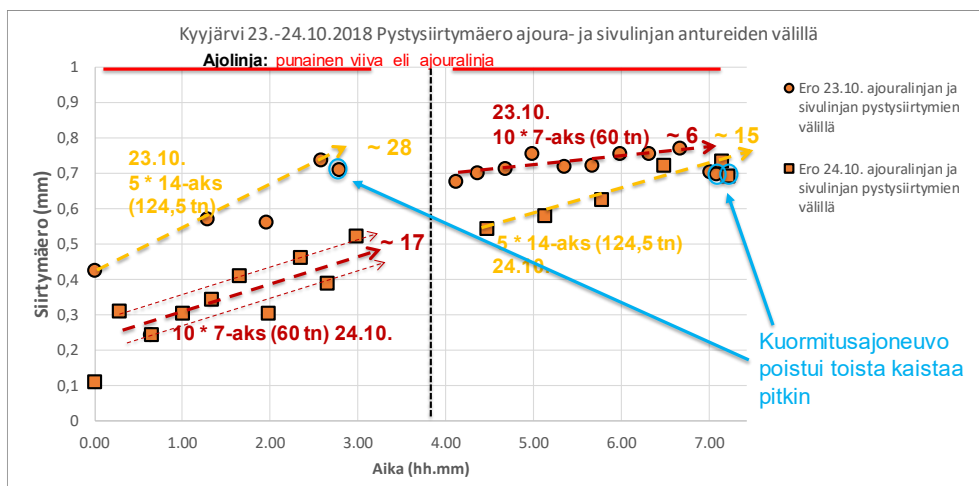
Kuva 43. Kyyjärven koekohteen ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureista vuonna 2018 mitatut tien päällysteen painumat vasemmalla ja oikealla niiden ero.

Kuvassa 44 on yhdistetty samaan kuvaan syksyn mittauspäivinä mitatut pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalta ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen kyseisenä mittauspäivänä. Kuvasta havaitaan ajouralinjan pysyvien siirtymien kasvavan ajan suhteen nopeammin kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajaessa peräkkäin kuin vastaavan massan kulkiessa samassa ajassa 20 minuutein välein 7-akselisen kuormitusajoneuvolla. Aamupäivällä sivulinjalla tien pinta kohosi kummallakin kuormitustavalla saman suuruisesti. Iltapäivällä ajettaessa kahdella 7-akselisella kuormitusajoneuvolla peräkkäin tien päällyste painui sivulinjalla, mutta kohosi yhden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajaessa yli.



Kuva 44. Syksyllä 2018 Kyyjärven kohteen mittauspäivinä mitatut pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjalta ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen. Sinisellä on ympyröity toista kaistaa pitkin poistunut kuormitusajoneuvo.

Kuvassa 45 on yhdistetty samaan kuvaan syksyn mittauspäivinä ajoura- ja sivulinjalta mitattujen pysyvien siirtymien ero ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen kyseisenä mittauspäivänä. Kuvasta havaitaan pysyvän siirtymäeron antureiden välillä kasvavan enemmän aamu- ja iltapäivällä kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon kulkiessa peräkkäin 40 minuutin välein kuin saman massan kulkiessa 7-akselisessa kuormitusajoneuvossa 20 minuutin välein. Painumero eli ura oli kumpanakin päivänä kasvanut yhteensä saman verran.

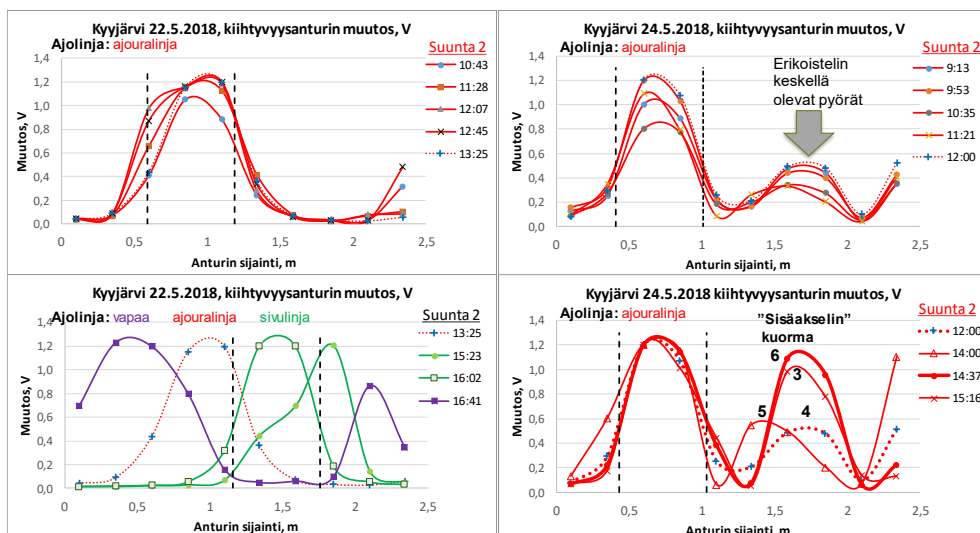


Kuva 45. Kyyjärven kohteen syksyn 2018 mittauspäivinä ajoura- ja sivulinjalta mitattujen pysyvien siirtymien ero ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen kyseisenä mittauspäivänä.

#### 4.2.3 Kiihtyvyyssantureiden perusteella määritetty ajolinjan sijainti ja päällysteen taipuma

Kiihtyvyyssantureita asennettiin Kyyjärven kohteen päällysteen pintaan yhteen riviin 10 kpl 0,25 m välein. Kiihtyvyyssantureilla oli tarkoitus varmistaa ajoneuvon ylityksen aikainen ajolinja ja määrittää tien pinnan taipuma. Kuvassa 46 on esitetty kuormitusajoneuvojen viimeisen telin aiheuttamat kiihtyvyyssantureiden suurimmat mitatut jännitemuutokset päällysteen reunan etäisyyden suhteen ajosuuntaan 2 ajettaessa 22. ja 24.5.2018. Yläkuoissa aamupäivällä kuormitusajoneuvon ylityksistä mitatut suurimmat kiihtyvyydet muodostivat hyvin samankaltaisen kuvaajan tarkoittaen ajolinjojen olleen lähellä toisiaan. 24.5.2018 kuormitusajoneuvon perävaunun viimeisessä telissä oli erikoisteli, jossa kahdella lisäakselilla oli perävaunun keskilinjalle sijoitetut paripyörät, joiden leveys oli 0,48 m. Nämä paripyörät näkyvät selkeästi 24.5.2018 kuvajissa.

Kuormitusajoneuvon ajolinjan muuttaminen näkyi hyvin 22.5.2018 ajettaessa ajosuuntaan 2 (alhaalla vasemmalla). Toinen ajosuuntaan 2 ajetuista sivulinjan ylityksistä erosi halutusta ajolinjasta. Lisäksi havaitaan, että vapaan ajolinjan ollessa lähellä tien reunaa kuormitusajoneuvon keskitien puoleiset renkaat alkavat näkyä alhaalla vasemmalla olevassa kuvassa. Oikealla alhaalla kuvassa 46 nähdään kiihtyvyyssantureista mitatut suurimmat jännitteet erikoistelin lisäakselien kuorman suuruuden muuttuessa ylityksillä suuntaan 2 ajettaessa. Kun lisäakselille tuleva kuorma oli suurin, myös mitattu jännite lisäakselin alla oli suurin. Lisäakseleiden erilaisilla kuormilla kiihtyvyyssanturista mitatut suurimmat jännitteet eivät aina olleet loogisia, koska esimerkiksi ajolinjan eroaminen halutusta vaikutti mittaustulokseen. Kiihtyvyyssantureiden keskinäisen välimatkan pienentäminen 0,15–0,20 m välille, jolloin paripyörän alle jäisi kolme ja yksittäispyörän alle todennäköisesti kaksi kiihtyvyyssanturia, parantaisi huomattavasti ajoneuvon ajolinjan määrittämisen tarkkuutta ja suurimman kiihtyvyyden määrittämisen luotettavuutta.

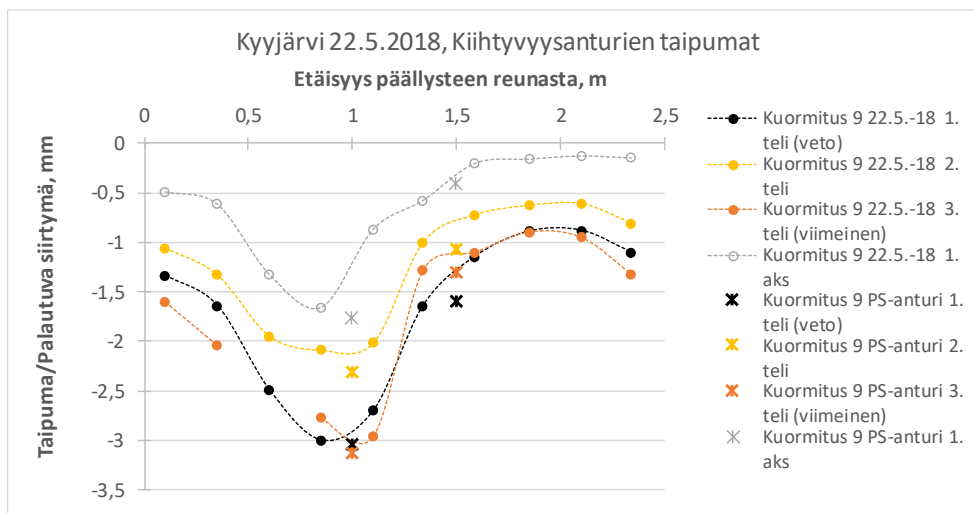


Kuva 46. Kiihtyvyyssantureiden suurimmat jännitteet voltteina viimeisestä telistä päällysteen reunan etäisyyden suhteen 22. ja 24.5.2018, kun kuormitusajoneuvot ajoivat suuntaan 2. Katkoviiva kuvaa paripyörän leveyttä.



Kuvissa 47–49 on esitetty Kyyjärven koekohteen kiihtyvyyssantureiden mittaus-tuloksista lasketut taipumat muutamista kuormitusajoneuvojen ylityksistä vuodelta 2018 esimerkinomaisesti. Tarkasteltavat kuormitukset on valittu siten, että kyseisen päivän kyseisellä ajolinjalla ajetuista kuormituksista aiheutuneet pysyvät siirtymät ovat olleet päivän pienimpiä pysyviä siirtymiä ja esimerkeissä on mukana tuloksia sekä keväältä että syksyiltä.

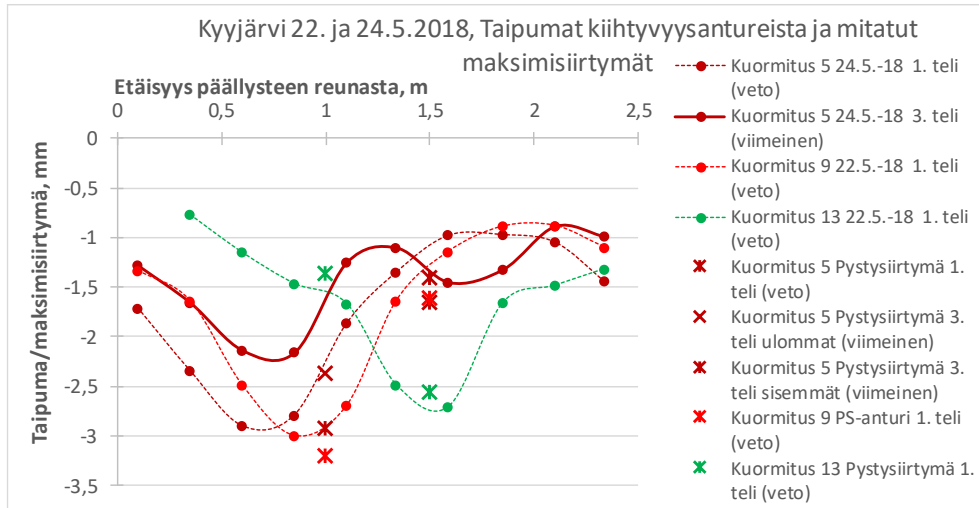
Kuvassa 47 on esitetty 22.5.2018 7-akselisen kuormitusajoneuvon yhdeksännen ylityksen aikana kiihtyvyyssantureista mitatuista arvoista lasketut tien pinnan suurimmat taipumat ensimmäisen akselin ja telien kohdalla sekä pystysiirtymä-antureista mitatut tienpinnan maksimisiirtymät. Havainnot on esitetty kuvassa päällysteen reunasta mitatun etäisyyden suhteen. Kiihtyvyyssanturit olivat tien pituussuunnassa vähän yli metrin etäisyydellä pystysiirtymäantureista. Ensimmäisen telin paino oli 20 tonnia ja muiden telien 18 tonnia. Kuormitusajoneuvon yhdeksännellä ylityksellä ajouralla tien pinnan pysyvä pystysiirtymä oli noin 0,1 mm ja sivulinjalla tien pinnan taso ei muuttunut. Kuvasta nähdään taipumien ja maksimisiirtymien vastaavan suhteellisen hyvin tosiaan siirtymäantureilla mitattujen pystysiirtymien ollessa noin 0,2 mm suurempia kuin kiihtyvyyssantureiden perusteella lasketut taipumat.



Kuva 47. Kyyjärven kiihtyvyyssantureista 22.5.2018 kuormituksesta 9 lasketut päällysteen taipumat ja pystysiirtymäantureilla mitatut tien pinnan maksimisiirtymät suhteessa päällysteen reunasta mitattuun etäisyyteen ylittäneellä akselilla/telillä. Selitteessä PS-anturi tarkoittaa pystysiirtymäanturia.

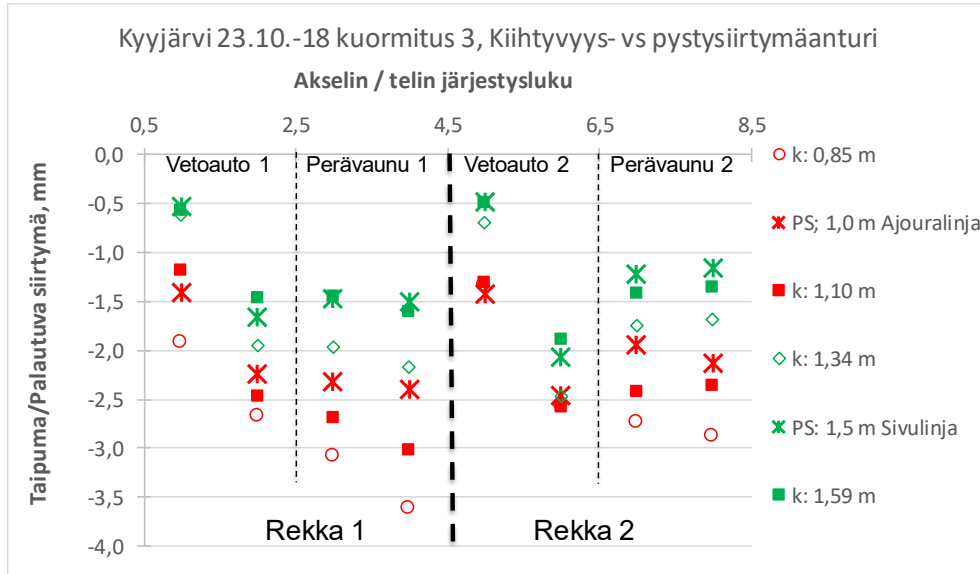
Kuvassa 48 on esitetty 22.5.2018 ajoura- ja sivulinjaa pitkin ajetuista ylityksistä (kuormitukset 9 ja 13) vetävän telin (1. teli) sekä 24.5.2018 ajouralinjaa pitkin ajetusta ylityksestä vetävän ja viimeisen telin aiheuttamat suurimmat taipumat kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksista laskettuna. Lisäksi kuvassa on esitetty pystysiirtymäantureilla mitatut maksimisiirtymät kyseisiltä teleiltä. 24.5.2018 kuormitusyhdistelmän perävaunun viimeinen teli oli erikoisvalmisteinen koostuen kolmen tavallisen akselin lisäksi kahdesta lisäakselista, joiden paripyörät olivat ajoneuvoyhdistelmän keskilinjalla. Ajouralinjaa pitkin ajettujen kuormitusten (5 ja 9) ylityksillä ajouralla tien pinnan pysyvät pystysiirtymät olivat noin 0,1 mm ja sivulinjalla tien pinnan taso ei muuttunut. Sivulinjaa pitkin ajetun kuormituksen 13 ylityksellä sivulinjalla tien pinnan pysyvä pystysiirtymä oli lähes 0,3 mm ja ajouralinjalla tien pinnan taso ei muuttunut. Kuvasta nähdään sivulinjan pitkin ajetun ylityksen hieman pienempi taipuma kuin ajouralinjaa

pitkin ajettaessa. Erikoistelin sisimpien paripyörien (24.5.2018 3. teli) aiheuttama taipuma näkyy selkeästi noin 1,7 m etäisyydellä päällysteen reunasta. Mitatut maksimisiirtymät telien kohdalla olivat noin 0,2 m suurempia kuin kiihtyvyyssantureiden perusteella lasketut taipumat.



Kuva 48. Kyyjärvellä 24.5.2018 kuormitusajoneuvon viidennen ylityksen vetävän ja viimeisen telin ja 22.5.2018 ylitysten 9 ja 13 vetävien telien aiheuttamista kiihtyvyyksistä lasketut päällysteen pinnan taipumat ja pystysiirtymäantureista mitatut tien pinnan maksimisiirtymät suhteessa päällysteen reunasta mitattuun etäisyyteen. Kuormitus 13 ajettiin sivulinjaa pitkin ja muut ajettiin ajouralinjaa pitkin. Selitteessä PS-anturi tarkoittaa pystysiirtymäanturia.

Kuvassa 49 on esitetty Kyyjärven 23.10.2018 kuormitusajoneuvon kolmannen ylityksen akselien/telien aiheuttamista kiihtyvyyksistä lasketut päällysteen pinnan taipumat ja pystysiirtymäantureilla mitatut tien pinnan maksimisiirtymät. Kuormitusajoneuvona ajouralinjaa pitkin tehdyssä ylityksessä oli kaksi peräkkäin ajavaa 7-akselista rekkaa. Ajouralla tien pinnan pysyvä pystysiirtymä tällä ylityksellä oli yli 0,2 mm ja sivulinjalla tien pinta kohosi noin 0,1 mm. Kuvasta nähdään pystysiirtymäantureista mitattujen maksimitaipumien olevan saman suuruisia kuin lähimmän kiihtyvyyssanturin mittaustuloksista laskettujen maksimitaipumien vetoautojen kohdalla. Ero on suurempi perävaunujen telien kohdalla.

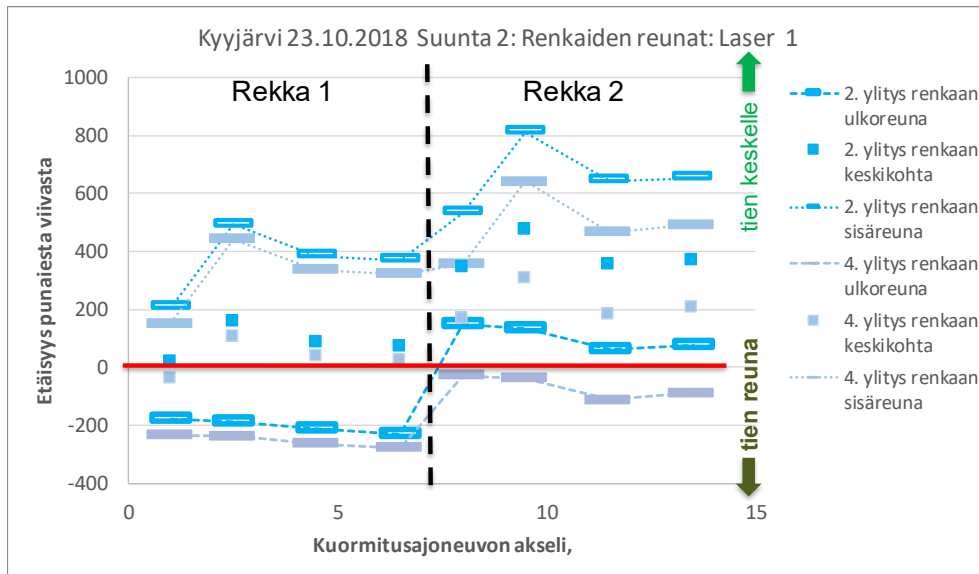


Kuva 49. Kyyjärven 23.10. kuormitusajoneuvon kolmannen ylityksen akselien tai telien aiheuttamista kiihtyvyyksistä lasketut päällysteen pinnan taipumat ja pystysiirtymäantureilla mitatut tien pinnan maksimisiirtymät. Selitteessä PS-anturi tarkoittaa pystysiirtymäanturia ja k kiihtyvyyssanturia sekä numero anturin etäisyyttä päällysteen reunasta.

Kyyjärven koekohteella kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksista lasketut tien pinnan maksimitaipumat vastasivat suhteellisen hyvin pystysiirtymäantureilla mitattuja tien pinnan pystysiirtymiä. Vetoauton kohdalla tulokset olivat lähempänä toisiaan kuin perävaunun osalta. Tämä johtuu integroinnin tarkkuuden heikkenemisestä integrointiin sisältyvän ajanjakson pidentyessä ja pakotettaessa taipuma palautumaan nolaksi ylityksen jälkeen. Lisäksi syksyllä erot kahden mittaustavan välillä vaikuttivat olevan pienempiä, kun pysyvä siirtymä oli pienempi.

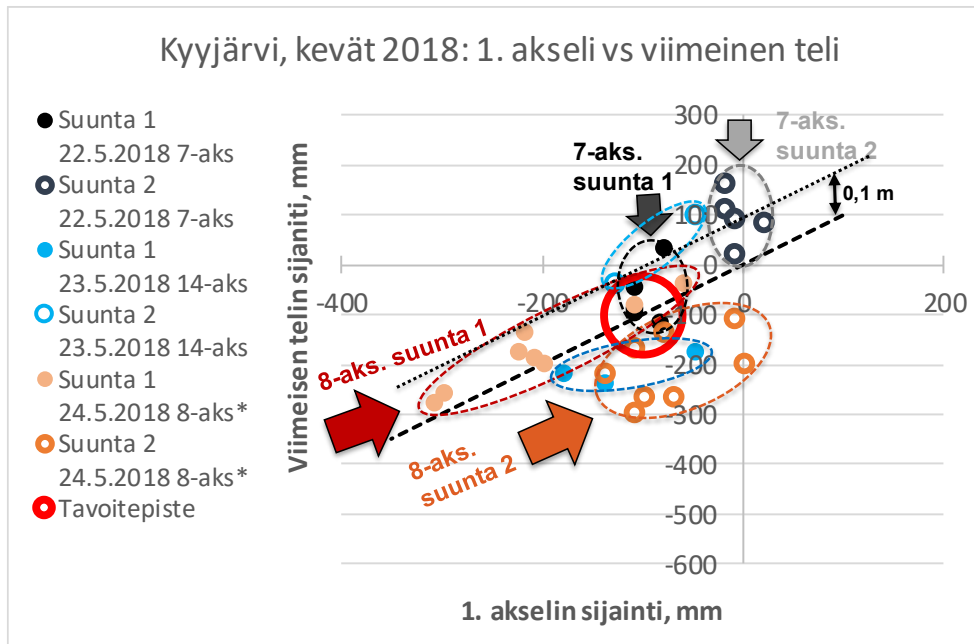
#### 4.2.4 Ajolinjan sijainti etäisyyslaserilla

Kuvassa 50 on esitetty 14-akselisen kuormitusajoneuvon kahden ylityksen renkaiden ulkoreunojen sekä keskikohtien sijainnit suhteessa ajouralinjan punaiseen viivaan, kun ylitykset tehtiin ajosuuntaan 2. Ensimmäisen rekan perässä ajaneen toisen rekan ajolinja on eronnut ensimmäisenä kulkeneen rekan ajolinjasta. Kuvasta 47 nähdään, että ensimmäisen akselin rengas on osunut keskelle ja ensimmäinen rekka on kulkenut hyvinkin suoraan, kun seurataan renkaiden ulkoreunaa. Koska renkaat olivat eri levyisiä renkaiden keskikohtien perusteella määritetty ajolinja vaikuttaa kulmikkaammalta verrattuna renkaiden ulkoreunan perusteella määritettyyn ajolinjaan. Tämä näkyy kulmikkautena ensimmäisen akselin yksikköpyörän jälkeen. Tämä ero voi olla 0,10–0,18 m ja paripyörien välillä enintään 0,05 m. Tämä on hyvä muistaa, kun vertaillaan ajolinjoja, jotka on laskettu renkaan keskikohdasta.



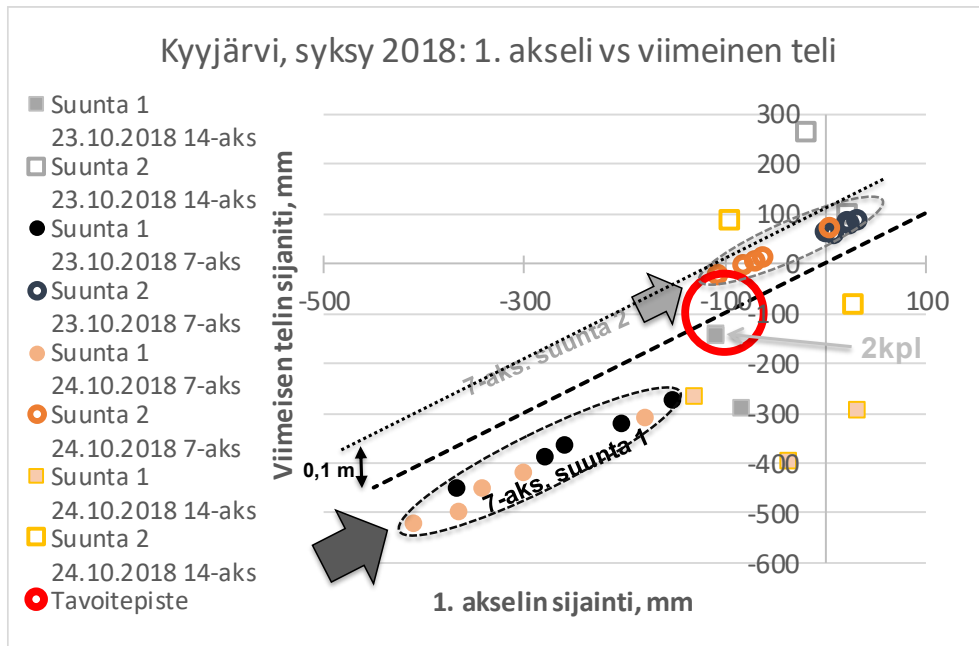
Kuva 50. Kyyjärvellä 23.10.2018 kuormitusajoneuvojen telien ja yksittäis-akseleiden renkaiden ulkoreunojen sekä keskikohtien sijainnit ajouralinjaan eli punaiseen viivaan nähden pystysiirtymäantureiden kohdalla kahdesta ylityksestä.

Kuvassa 51 on esitetty Kyyjärven kohteen kuormitusajoneuvojen ensimmäisen ja viimeisen telin sijainti suhteessa ajouralinjan pystysiirtymäanturiin sen kohdalla, kun kuormitusajoneuvot ajoivat ajouralinjaa pitkin keväällä 2018. Kuormitusajoneuvon ajouralinja eli tiehen piirretty punainen ympyrä on merkitty kuvassa tavoitepisteinä. Jos eri ylityksiä vastaavat pisteet kuvassa 51 ovat katkoviivalla, kuormitusajoneuvon ensimmäisen akselin ja viimeisen telin renkaiden keskikohtat ovat kulkeneet samaa ajolinjaa pitkin. Kun ensimmäisen yksittäispyörän ja viimeisen telin paripyörän keskipisteiden kohta eroaa toisistaan 0,1-0,15 m pallojen pitäisi olla noin 0,1 m katkoviivan yläpuolella rekan kulkiessa suoraan. Mitä kauempana pallot ovat katkoviivasta, sitä enemmän viimeisen telin renkaat ovat ylityksen aikana eronneet ensimmäisen renkaan kohdasta eli kuormitusajo ei ole kulkenut koko pituudellaan samaa ajolinjaa. Enimmillään ensimmäisen ja viimeisen telin renkaiden keskikohtien sijainnin ero pystysiirtymäantureiden kohdalla oli 0,2 m. Mitä enemmän kuormitusajoneuvon piste eroaa tavoitepisteestä, sitä kauempana halutusta ajolinjasta kuormitusajoneuvo kulki. Enimmillään ensimmäinen akseli erosi tavoitelluista ajolinjasta 0,2 m. Kuvasta 51 nähdään ajosuunnan vaikuttaneen kuormitusajoneuvon toteutuneeseen ajolinjaan suhteessa haluttuun ajolinjaan. Toteutuneeseen ajolinjaan vaikutti myös kuljettaja, koska 8-akselisen erikoistelillä varustetun kuormitusajoneuvon toteutuneet ajolinjat poikkesivat 7-akselisen rekan ajolinjoista. Kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon kulkiessa peräkkäin, niiden ajolinjat eivät kuitenkaan eronneet merkittävästi 7- ja 8-akselisten kuormitusajoneuvojen ajouralinjoista Kyyjärvellä keväällä 2018. Kuormitusajoneuvon ajolinjojen kohdat erosivat eniten 8-akselisella rekalla erityisesti suuntaan 1 ajettaessa. Ajolinjojen hajonta oli pienin 7-akselisella kuormitusajoneuvolla 22.5.2018.



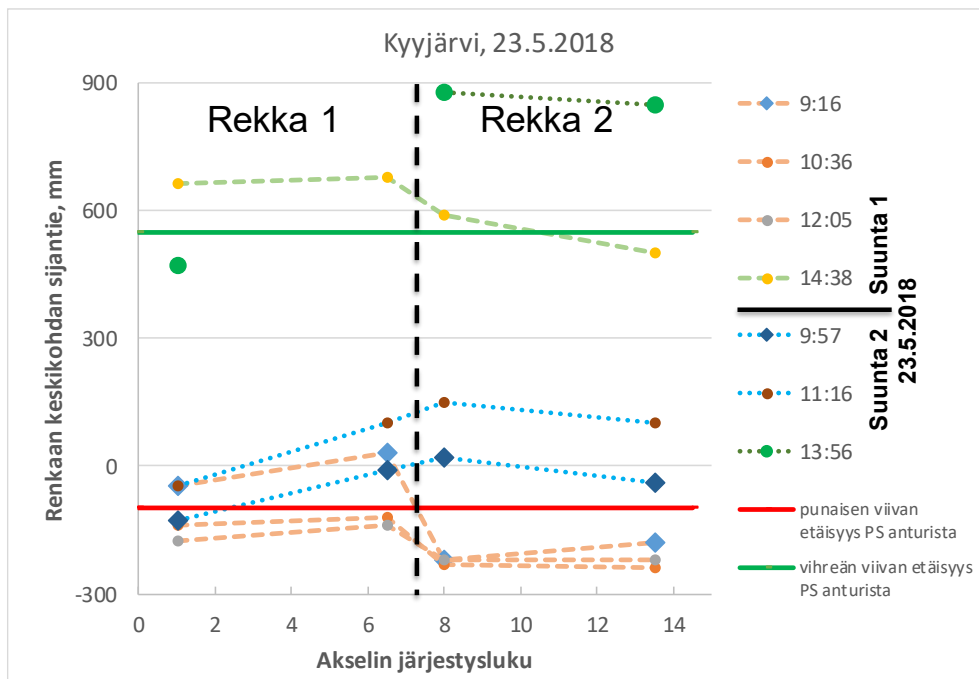
Kuva 51. Kuormitusajoneuvon ensimmäisen akselin ja viimeisen telin sijainti ajouralinjan pystysiirtymäanturin kohdalla Kyyjärven kohteen kevään 2018 kuormituksissa.

Kuvassa 52 on esitetty Kyyjärven kohteen kuormitusajoneuvojen ensimmäisen ja viimeisen telin sijainti suhteessa ajouralinjan pystysiirtymäanturiin sen kohdalla, kun kuormitusajoneuvot ajoivat ajouralinjaa pitkin syksyllä 2018. Enimmillään ensimmäisen ja viimeisen telin sijainnin ero pystysiirtymäantureiden kohdalla oli 0,2 m 7-akselisella kuormitusajoneuvolla ja lähes 0,4 m kahdella peräkkäin kulkeneella 7-akselisella kuormitusajoneuvolla. Enimmillään ensimmäinen akseli erosi tavoitelluista ajolinjasta 0,3 m. Kuvasta 52 nähdään ajosuunnan vaikuttaneen selkeästi kuormitusajoneuvon toteutuneeseen ajolinjaan suhteessa haluttuun ajolinjaan. Koska 7-akselisen kuormitusajoneuvon kuljettaja oli sama kumpanakin päivänä, kuvasta nähdään ylitysten eronneen lähinnä ensimmäisen akselin sijainnin osumisessa halutulle ajolinjalle, jolloin perävaunu seurasi hyvin samalla tavalla perässä. Kaarteesta mittauspisteeseen tullessa (ajosuunta 1) osumatarkkuudessa oli suurempi hajonta kuin suoraa linjaa mittauspistettä kohti ajettaessa (ajosuunta 2). Kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon kulkiessa peräkkäin syksyllä 2018 Kyyjärven koekohteella, niiden ajolinjat erosivat merkittävästi 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajouralinjoista erityisesti ensimmäisen akselin ja viimeisen telin sijainnin osalta.



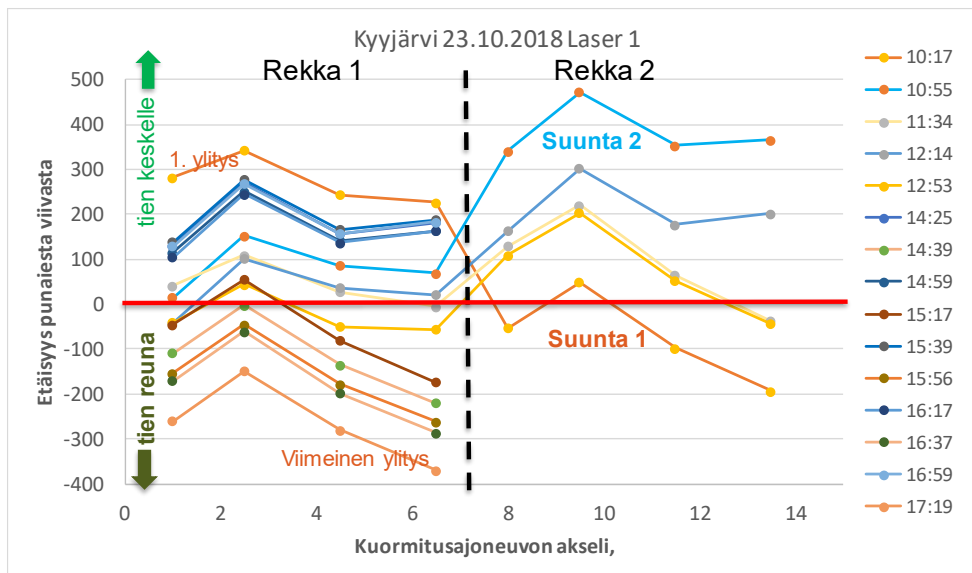
Kuva 52. Kuormitusajoneuvon ensimmäisen akselin ja viimeisen telin sijainti ajouralinjan pystysiirtymäanturin kohdalla Kyyjärven kohteen syksyn 2018 kuormituksissa.

Kuvassa 53 on esitetty 23.5.2018 peräkkäin ajaneiden kahden 7-akselisen rekan ensimmäisen akselin ja viimeisen telin renkaiden keskikohtien sijainnit suhteessa ajouralinjan pystysiirtymäanturiin. Ensimmäinen akseli oli kulkenut hyvin lähellä haluttua ajolinjaa, mutta toisen rekan ajolinja on vaihdellut selvästi enemmän.



Kuva 53. Peräkkäin ajaneiden kahden 7-akselisen rekan ensimmäisen akselin ja viimeisen telin renkaiden keskikohtien sijainnit suhteessa ajouralinjan pystysiirtymäanturiin 23.5.2018.

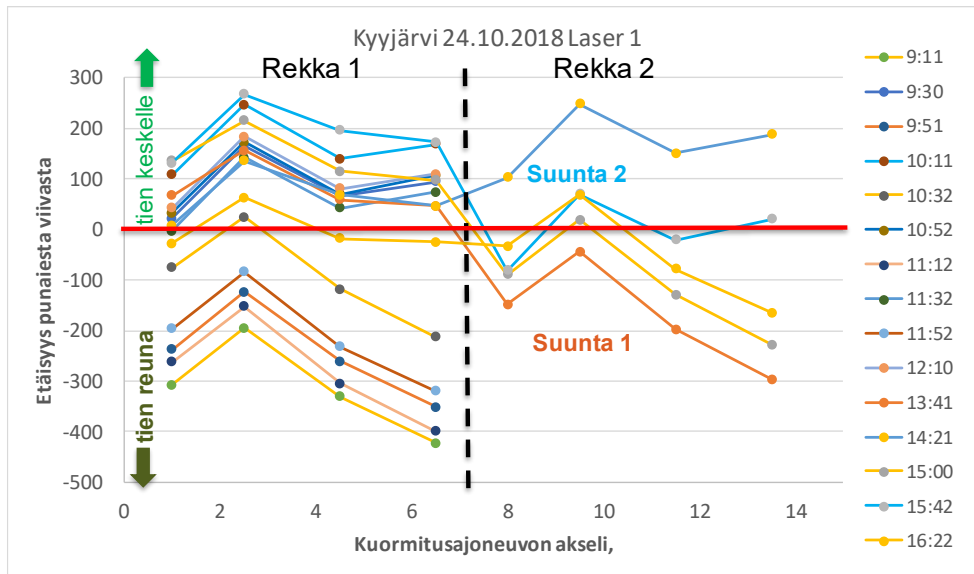
Kuvissa 54 ja 55 on esitetty kuormitusajoneuvojen telien ja yksittäisakseleiden renkaiden keskikohtien sijainnit ajouralinjaan eli punaiseen viivaan nähden Kyyjärven koekohteella 23. ja 24.10.2018. Ensimmäisenä kuormituspäivänä 23.10.2018 14-akselinen ajoneuvoyhdistelmä kulki keskimäärin 0,1 m keskemällä tietä kuin 7-akselinen rekka. Toisena kuormituspäivänä 24.10.2018 kuormitusajoneuvoyhdistelmien viimeiset telit kulkivat keskimäärin samasta kohtaa, mutta kaikki telit huomioiden 14-akselinen ajoneuvoyhdistelmä kulki lähes 0,1 m keskemällä tietä. Yhdellä ylityksellä 14-akselisen ajoneuvoyhdistelmän telin renkaiden keskikohtien keskihajonta oli suurempi kuin yhden 7-akselisen rekan, joka johtui suurelta osin siitä, että 14-akselisessa ajoneuvoyhdistelmässä jälkimmäinen rekka ei seurannut ensimmäistä rekkaa ideaalisesti samalla ajolinjalla. Kuvista havaitaan ajosuuntaan 1 ajettaessa ajolinjan hajonnan olleen suurempi. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että ajosuuntaan 2 mittaushaaraan ajettiin suoraa tietä pitkin ja ajosuuntaan 1 tultiin kaarteesta. Lisäksi 23.10.2018 ensimmäinen ylitys poikkeasi ajosuunnan 1 ylityksistä selvästi eniten. Ajettaessa suuntaan 1 kuormitusajoneuvo kulki tyypillisesti reunempana tietä kuin suuntaan 2 ajettaessa.



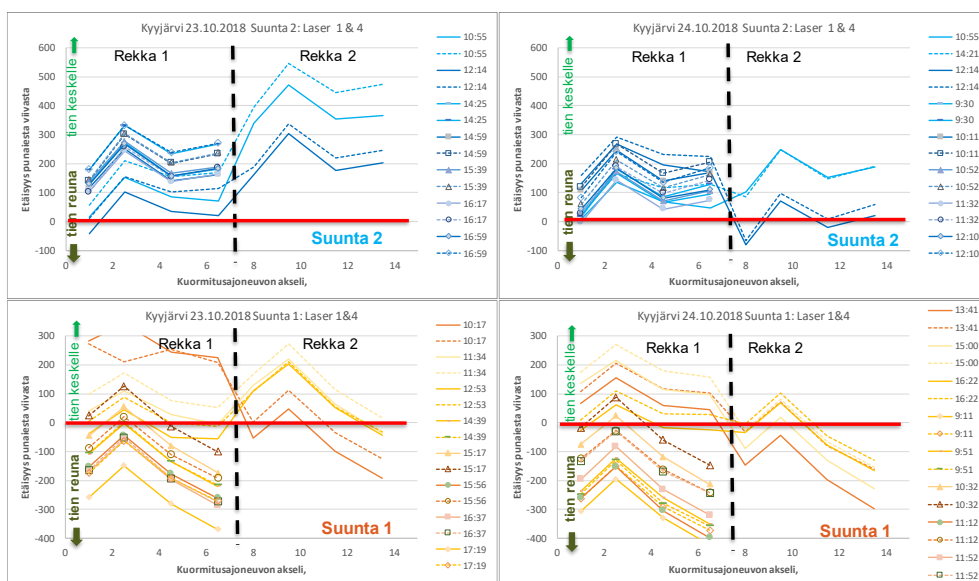
Kuva 54. Kyyjärvellä 23.10.2018 kuormitusajoneuvojen telien ja yksittäisakseleiden renkaiden keskikohtien sijainnit ajouralinjaan nähden. Ylitykset ajosuuntaan 2 on kuvattu sinisellä ja ajosuuntaan 1 kellertävällä viivalla.

Mittauksissa käytettiin myös toista etäisyyslaseria (Laser 4), joka sijaitsi enemmän kaarteiden puolella noin 10 m päässä pystysiirtymäantureiden kohdalla sijainneesta etäisyyslaserista. Kuvassa 56 on esitetty samat mittaustulokset kuin kuvissa 54 ja 55, mutta jaoteltuina ajosuunnittain ja lisättynä toisesta pisteestä mitatuilla katkoviivoilla merkityillä etäisyyslaserin tuloksilla. Kuvasta havaitaan, että etäisyyslaserien tulokset ovat hyvin samanlaiset. Ensimmäisenä mittauspäivänä ajosuuntaan 1 ja 2 Laser 4:n kohdalla ajolinja pysyi samalla etäisyydellä ajouralinjasta eli punaisesta viivasta tai kulki 14-akselisella kuormitusrekalla enimmillään 0,15 m keskemällä tietä kuin Laser 1:n kohdalla. Seuraavana päivänä ajosuuntaan 1 Laser 4:n kohdalla ero oli sama kuin edellisenä päivänä, mutta ajosuuntaan 2 se oli pienempi. Keskimäärin toisen etäisyyslaserin (Laser 4) kohdalla telit kulkivat noin 50 mm keskemällä tietä kuin varsinaisessa mittauspisteessä.





Kuva 55. Kyyjärvellä 24.10.2018 kuormitusajoneuvojen telien ja yksittäisakselien renkaiden keskikohdan sijainnit ajouralinjaan nähden. Ylitykset ajosuuntaan 2 on kuvattu sinisellä ja ajosuuntaan 1 kellertävällä viivalla.



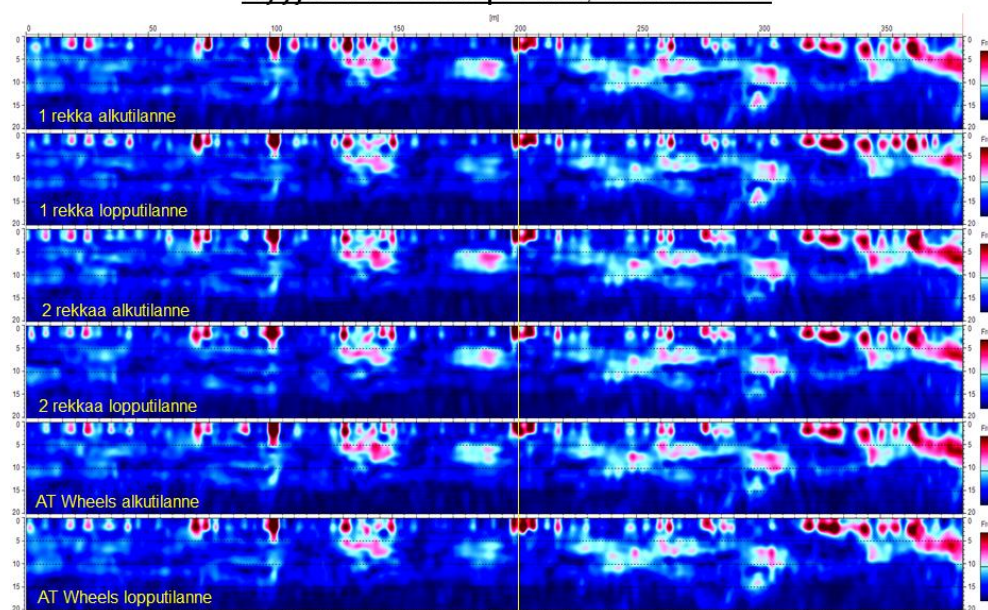
Kuva 56. Kyyjärvellä 23. ja 24.10.2018 kuormitusajoneuvojen telien ja yksittäisakselien renkaiden keskikohdan sijainnit ajouralinjaan eli punaiseen viivaan nähden kahdessa kohdassa noin 10 m etäisyydellä toisistaan. Katkoviivalla on merkitty etäisyydet Laser 4:n kohdalla.

## 4.2.5 Kosteuden muutokset maatutkamittauksella

### 4.2.5.1 Kevät 2018

Maatutkan 400 MHz:n antennidatasta lasketut kosteusprofiilikuvat on esitetty kuvissa 56 ja 57. Kuvassa 56 on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen kaikilta kolmelta mittauspäivältä. Kuvan 57 ylimmässä kosteusprofiilissa on tilanne ennen kuormitusajoja eli ensimmäisen mittauspäivän alkutilanne ja seuraavassa kosteusprofiilissa on tilanne ensimmäisen päivän puolivälissä, kun aamupäivä ajot kahdella rekalla on ajettu, ennen iltapäivän ajoja yhdellä rekalla sekä kolmannessa kosteusprofiilissa on tilanne ensimmäisen mittauspäivän päätteeksi. Seuraavissa kolmessa kosteusprofiilissa on esitetty vastaavat tilanteet toisen mittauspäivän osalta. Kuvista nähdään, että kosteusprofiilit ovat pysyneet lähes täysin muuttumattomina, eivätkä kosteusolosuhteet tierakenteessa ole muuttuneet kuormitusten aikana. Pumpautumiseen viittaavaa kosteuden nousua rakenteessa ei siis havaita. Lisäksi kosteusprofiilit ovat jopa lähes identtiset keväällä ja syksyllä.

#### Kyyjärvi kosteusprofiilit, kevät 2018



Kuva 56. Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) keväältä 2018. Kuvassa on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen kaikilta kolmelta mittauspäivältä. Pystymitta-kaava on nanosekunti (ns), jossa yksi nanosekunti vastaa noin 6 cm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Tiehen asennetun siirtymä-anturin kohta on merkitty keltaisella pystyviivalla.



Kuva 57. Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) syksyeltä 2018. Pystymitta-kaava on nanosekunti (ns), jossa yksi nanosekunti vastaa noin 6 cm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Tiehen asennetun siirtymä-anturin kohta on merkitty keltaisella pystyviivalla.

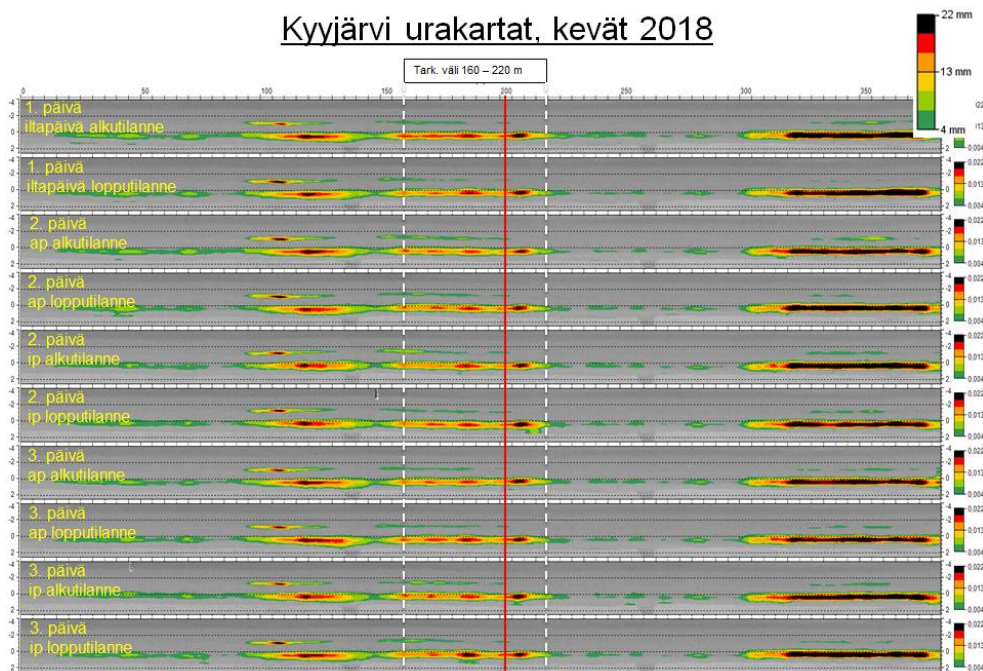
## 4.2.6 Laserkeilauksella mitattu urautuminen

### 4.2.6.1 Kevät 2018

Kuvassa 58 on esitetty urasyvyyskartat ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen kolmelta peräkkäiseltä mittauspäivältä. Ensimmäiseltä päiväältä on esitetty vain iltapäivän alku- ja lopputilanne, koska ensimmäisen mittauspäivän aamupäivältä ei saatu laserkeilausdataa talteen mittauslaitteessa tapahtuneen teknisen ongelman vuoksi. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissio-data päällysteestä. Mittausantureiden sijainti on merkitty punaisella pystyviivalla.

Kuvassa 59 on esitetty kuvan 58 urasyvyyskartoista johdetut maksimiurasyvyudet ja urakasvut Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) keväällä 2018. Urasyvyyskuvaajissa tilanne ennen kuormitusajoja on merkitty vihreällä ja tilanne viimeisen ajon jälkeen punaisella. Näiden erotus, eli urakasvu, on merkitty samaan kuvaajaan mustalla.

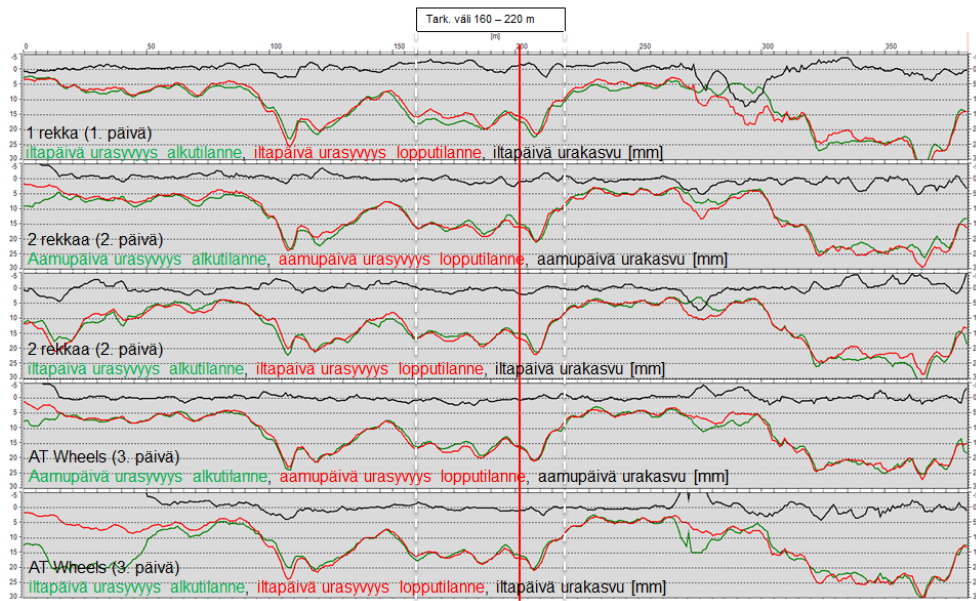




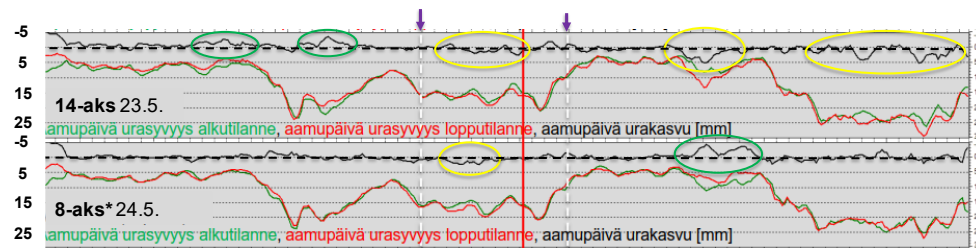
Kuva 58. RDSV-urasyvyyskartat Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) 22.–24.5.2018. Kuvassa on esitetty urasyvyyskartat ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen kolmelta peräkkäiseltä mittauspäivältä. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Mittaus-antureiden sijainti on merkitty punaisella pystyviivalla.

Kuvassa 60 on esitetty tarkemmin RDSV-urasyvyyskarttojen suurimmat urasyvyydet ennen 23. ja 24.5.2018 aamupäivän kuormituksia ja niiden jälkeen sekä urasyvyyden muutos kyseisillä aikaväleillä. Ensimmäisenä mittauspäivänä (22.5.) aamupäivällä laserkeilaimen urasyvyysdata ei tallentunut, joten siitä ei mittaustulosta. Kuvassa keltaiset ellipsit tarkoittavat merkittävää urasyvyyden kasvua ja vihreät ellipsit urasyvyyden pienemistä. Kuvasta nähdään kahden peräkkäin ajaneen 7-akselisen rekan aiheuttaneen 23.5. viidellä ylityksellä enemmän muutoksia kuin erikoistelin omaavalla perävaunulla varustettu 8-akselinen rekka 24.5. kymmenellä ylityksellä. Mutta 60 metrin tarkasteluvälillä urasyvyyden kasvut olivat 23.5. 0,3 mm ja 24.5. 0,5 mm eli kaksi peräkkäin ajanutta 7-akselista rekkaa olisi aiheuttanut keskimäärien hieman vähemmän urasyvyyden kasvua. Toisaalta mittauspisteestä  $\pm 5$  m matkalla 14-akselisen kuormitusajoneuvon viisi ylitystä aiheutti keskimäärin 1,3 mm urasyvyyden kasvun, joka oli huomattavasti suurempi kuin seuraavana päivänä 8-akselisen kuormitusajoneuvon kymmenen ylityksen aiheuttama 0,2 mm urasyvyyden kasvu. Täten tarkasteluväli saattaa muuttaa tulosta, jos kyseisellä välillä urasyvyys vaihtelee ja sillä on epätasaisesti urautuvia alueita, kuten kuvasta 59 havaitaan Kyyjärven koekohteella olevan. Tien vaihteleva urasyvyys saattaa indikoida myös kuormituksen dynaamisen suuruuden vaihtelevan paikallisesti, mikä voi johtua tien pinnan pituussuuntaisista epätasaisuuksista tai ajolinjojen vaihteluiden aiheuttamasta ajoneuvojen heilahteluista renkaiden poiketessa ajouraan tai siitä pois.

### Kyyjärvi urasyvytydet ja urakasvut, kevät 2018



Kuva 59. Maksimiurasyvytydet ja urakasvut Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) keväällä 2018. Urasyvyyskuvaajissa tilanne ennen kuormitusajoja on merkitty vihreällä ja tilanne viimeisen ajon jälkeen punaisella. Näiden erotus, eli urakasvu, on merkitty samaan kuvaajaan mustalla.

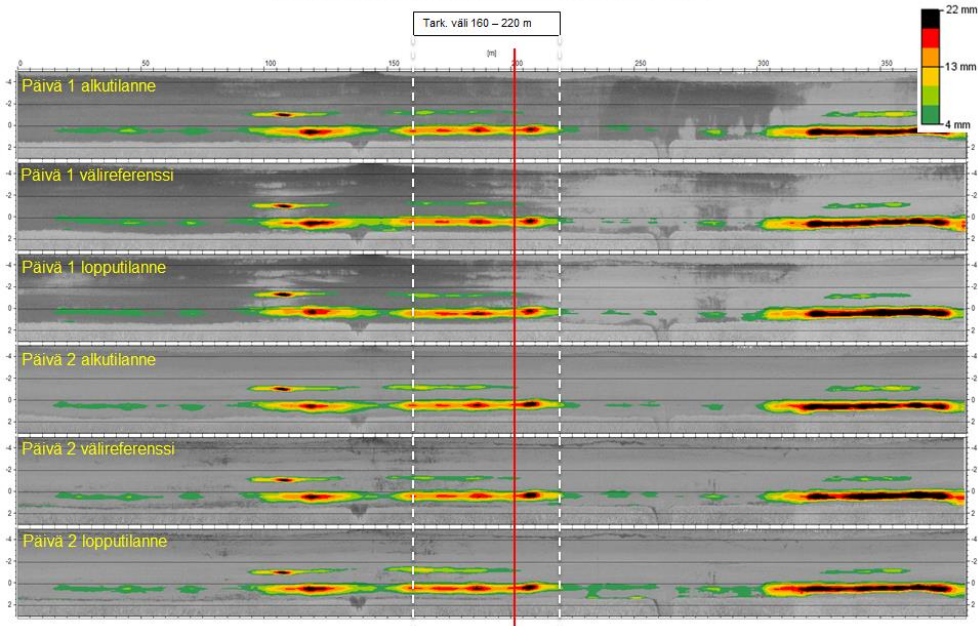


Kuva 60. Suurimmat urasyvytydet ennen 23. ja 24.5.2018 aamupäivän kuormituksia ja niiden jälkeen sekä urasyvytyden muutos kyseisiä väleinä Kyyjärven koekohteella. Keltaiset ellipsit tarkoittavat merkittävää urasyvytyden kasvua ja vihreät ellipsit urasyvytyden pienemistä.

#### 4.2.6.2 Syksy 2018

Kuvassa 61 on esitetty RDSV-urasyvyyskarttoja Kyyjärven (Mt 16863) mittausjaksolta syksyiltä 2018. Ylimmässä urakartassa on tilanne ennen kuormitusajoja eli ensimmäisen mittauspäivän alkutilanne. Seuraavassa urakartassa on tilanne ensimmäisen päivän puolivälissä, kun aamupäivä ajot kahdella rekalla on ajettu, ennen iltapäivän ajoja yhdellä rekalla. Kolmannessa urakartassa on tilanne ensimmäisen mittauspäivän päätteeksi. Seuraavissa kolmessa urakartassa on esitetty vastaavat tilanteet toisen mittauspäivän osalta. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä.

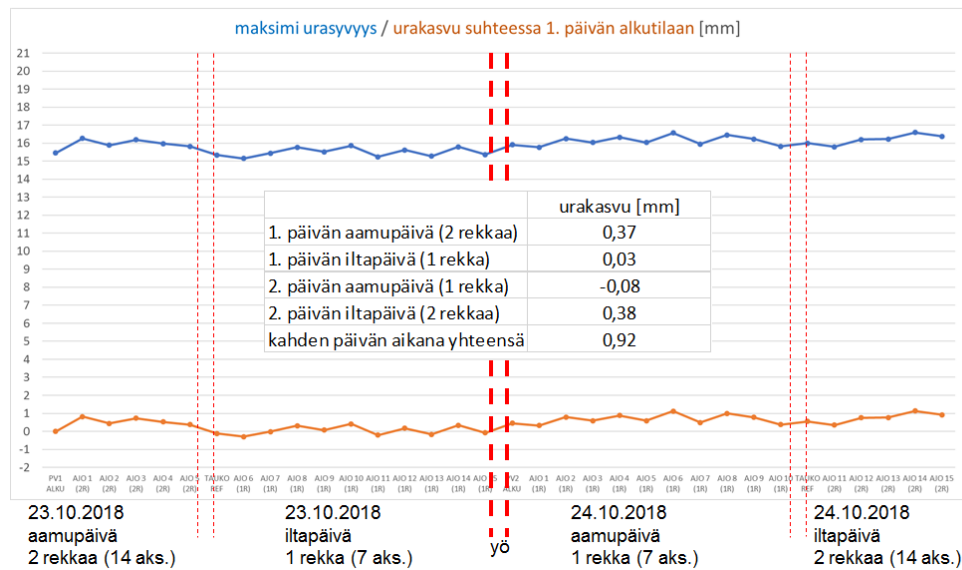
### Kyyjärvi urakartat, syksy 2018



Kuva 61. RDSV-urasyvyyskarttoja Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) 23. ja 24.10.2018. Tiehen asennettujen anturien sijainti on merkitty punaisella pystyviivalla.

Tuloksia tarkasteltiin erityisesti 60 metrin matkalla paaluvälillä 160–220. Käytännössä urasyvyyksien eroja on varsin vaikea erottaa visuaalisesti suoraan kartasta, jossa yksi väri vastaa kolmea millimetriä. Kuvassa 62 onkin esitetty mitatun maksimiurasyvyyden keskiarvo paaluvälillä 160–220 sekä maksimiurasyvyyden kasvu suhteessa ensimmäisen päivän alkutilanteeseen jokaiselta mittausajolta. Kuvassa olevassa taulukossa on lisäksi esitetty aamu- ja ilta-päivän aikana tapahtunut urakasvu. Kuormitusajoneuvojen ajosuunnan vaihtuminen havaitaan kuvassa kuvaajien selkeähkönä sahalaitakuviona. Paaluväliltä 160–220 m laskettu urakasvun keskiarvo on ollut kahdella rekalla (5 x 14 akselia) ajettaessa ensimmäisen päivän aamupäivällä 0,4 mm ja toisen päivän ilta-päivällä 0,4 mm. Yhdellä rekalla (10 x 7 akselia) ajettaessa urakasvun keskiarvo on ollut ensimmäisen päivän ilta-päivällä 0,0 mm eli uran syvyys ei kasvanut ja toisen päivän aamupäivällä -0,1 mm eli uran syvyys pieneni vähän. Tulosten valossa siis molempien mittauspäivien aikana 14-akselinen yhdistelmä on aiheuttanut suuremman urakasvun kuin 7-akselinen yhdistelmä, kun yhdistelmissä on kulkenut mittaus-alueen yli sama massa samassa ajassa.

### Kyyjärvi urasyvyydet ja urakasvut plv 160-220, syksy 2018



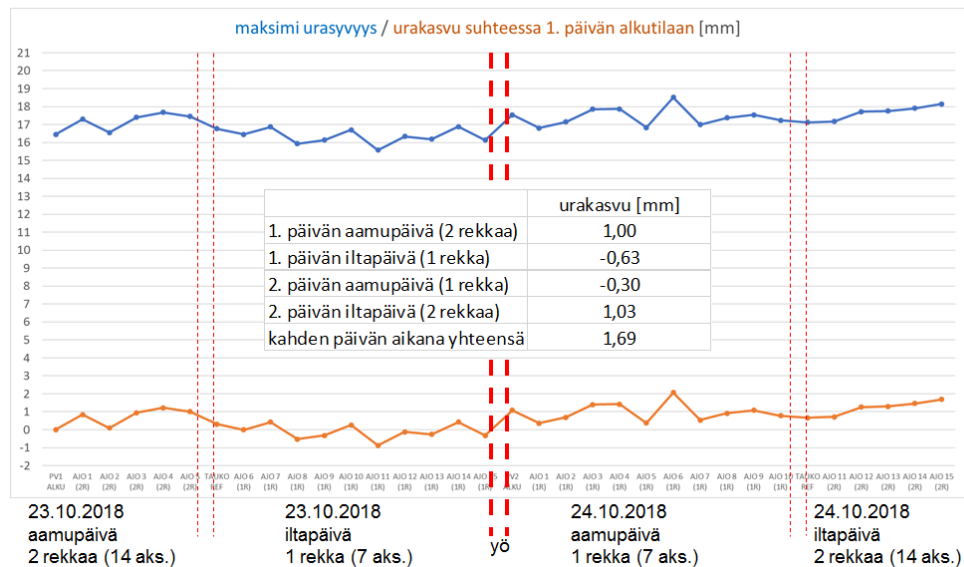
Kuva 62. Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) syksyllä 2018 mitatun maksimi-urasyvyyden keskiarvo paaluvälillä 160-220 sekä maksimiurasyvyyden kasvu suhteessa ensimmäisen päivän alkutilanteeseen jokaiselta mittausajolta.

Urasyvyyden muutoksia tarkasteltiin myös lyhyemmällä matkalla tiehen asennettujen anturien ympäristössä. Kuvassa 63 on esitetty vastaavat kuvaajat ja taulukko kuin edellisessä kuvassa, mutta nyt laskenta on tehty 10 metrin matkalta ( $\pm 5$  m) anturien ympäristössä. Tuloksista havaitaan, että uramittaus-ten hajonta ja erityisesti ajosuuntien välisestä sivusuuntaisesta ajolinjan vaihtelusta johtuva "sik-sak" ilmiö korostuvat. Kuitenkin lasketut urakasvun keskiarvot osoittavat samaa kuin 60 metrin matkalta laskettuna, siis molempien mittauspäivien aikana 14-akselinen yhdistelmä on aiheuttanut urasyvyyden kasvua 1,0 mm ja 7-akselinen yhdistelmä on pienentänyt uran syvyyttä, kun yhdistelmissä on kulkenut mittausalueen yli sama massa samassa ajassa.

Herkkyystarkastelumielessä urasyvyyden muutoksia tarkasteltiin vielä siten, että 10 metrin laskentaväliä siirrettiin 5 metriä eteenpäin ja taaksepäin. Eli laskenta tehtiin siis välillä -10-0 metriä ennen antureita ja välillä 0-10 metriä antureiden jälkeen. Nämä tulokset on esitetty kuvissa 64 ja 65. Tämä ei kuitenkaan muuttanut 14-akselisen ja 7-akselisen yhdistelmän välistä järjestystä urasyvyyden aiheuttajina. Herkkyystarkastelusta havaitaan kuitenkin, että mittauspisteen kohdalla urasyvyyden kasvu muuttuu paikallisesti suhteellisen paljon ja kuvasta 59 nähdään kyseisellä kohdalla olevan suuret urasyvyydet ja niiden muuttavan lyhyellä matkalla suhteellisen paljon.

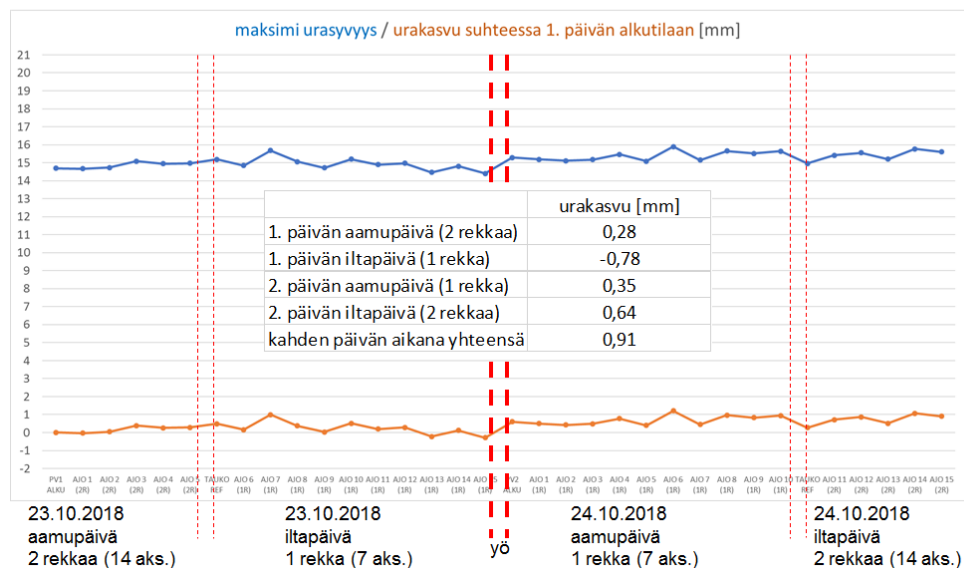


### Kyyjärvi urasyvyydet ja urakasvut $\pm 5$ metriä, syksy 2018



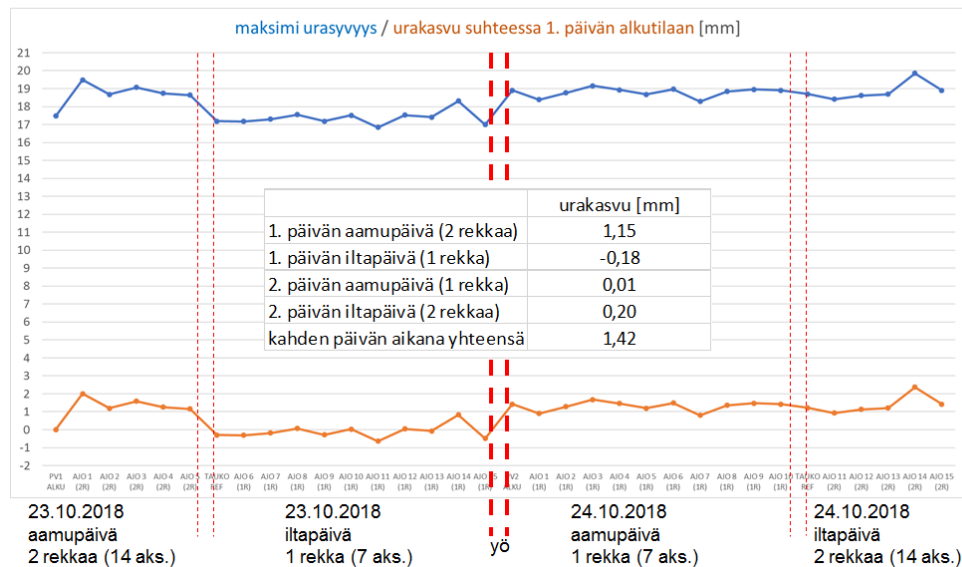
Kuva 63. Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) syksyllä 2018 mitatun maksimi-urasyvyyden keskiarvo  $\pm 5$  m matkalla anturien ympäristössä sekä maksimiurasyvyyden kasvu suhteessa ensimmäisen päivän alkutilanteeseen jokaiselta mittausajolta.

### Kyyjärvi urasyvyydet ja urakasvut -10 – 0 metriä, syksy 2018



Kuva 64. Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) syksyllä 2018 mitatun maksimi-urasyvyyden keskiarvo välillä -10 - 0 metriä ennen antureita sekä maksimiurasyvyyden kasvu suhteessa ensimmäisen päivän alkutilanteeseen jokaiselta mittausajolta.

### Kyyjärvi urasyvyydet ja urakasvut 0 – 10 metriä, syksy 2018



Kuva 65. Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) syksyllä 2018 mitatun maksimiurasyvyyden keskiarvo välillä 0 – 10 metriä antureiden jälkeen sekä maksimiurasyvyyden kasvu suhteessa ensimmäisen päivän alkutilanteeseen jokaiselta mittausajolta.

## 4.2.7 Urasyvyyden ja pystysiirtymäantureiden siirtymäeron muutokset

### 4.2.7.1 Yleistä

Tarkasteltaessa urasyvyyksien muutoksia ja pystysiirtymäantureiden siirtymäeron muutoksia keskenään on tiedostettava seuraavat kaksi asiaa:

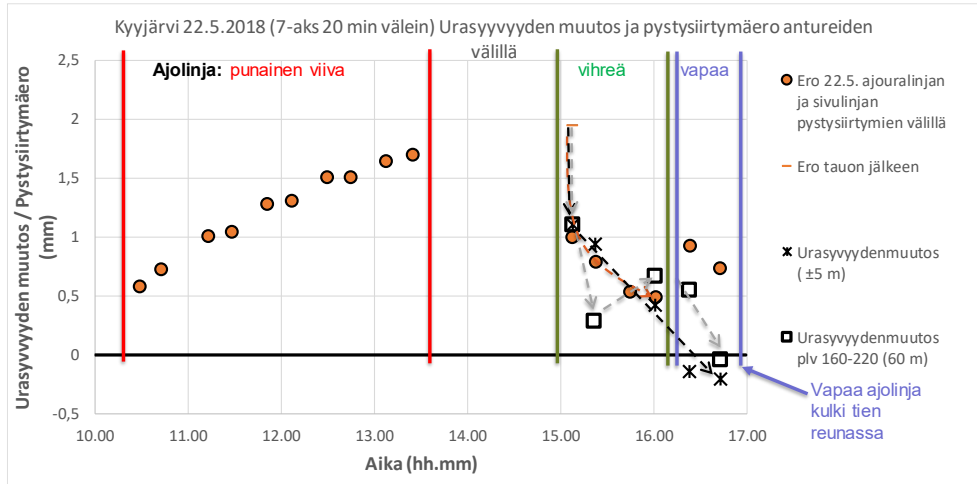
- Lyhyeltä väliltä pystysiirtymäantureiden läheltä mitattu urasyvyyden muutos vastaa todennäköisesti paremmin siirtymäeron muutos kuin pitkältä matkalta tarkasteltu urasyvyyden muutos.
- Siirtymäeron muutos on kahden saman pisteen välillä tapahtunutta muutosta, kun urasyvyyden muutosta voi muodostua eri kuormituskerroilla eri kohtaan tien pituus- tai poikkileikkausta.

Lisäksi ajolinjat on mitattu pystysiirtymäantureiden kohdalla olleella etäisyyslaserilla (Laser 1). Joten on epävarmaa, noudattivatko kuormitusajoneuvot piirrettyjä ajolinjoja paremmin vai huonommin kauempana varsinaisesta mittauspisteestä.

### 4.2.7.2 Kevät 2018

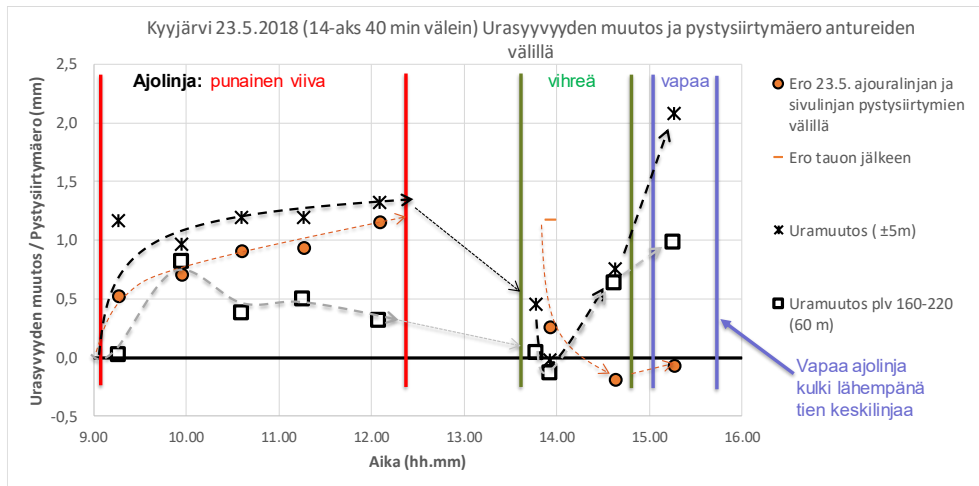
Kuvassa 66 on esitetty ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäanturien välinen pysyvien siirtymien ero ja eri tarkasteluväleiltä urasyvyyden muutokset Kyyjärven koekohteelta 22.5.2018. Aamupäivällä laserkeilaimen data ei tallentunut ja tarkasteluväleillä urasyvyyden muutos on asetettu alkamaan samasta kohdasta kuin pystysiirtymäantureiden ero tauon jälkeen. Iltapäivän kuormituksista nähdään  $\pm 5$  m etäisyydeltä pystysiirtymäantureista mitattujen urasyvyysmuutosten olevan saman suuruisia kuin pystysiirtymäanturien siirtymäero, kun kuormitusajoneuvot ajoivat sivulinjaa pitkin. Tarkasteluvälillä plv 160-220 pysyvien siirtymien ero laserkeilaimella mitattuun urasyvyyden muutokseen oli suurempi. Ajolinjan vaihtuminen 0,65 m keskemälle tietä pienensi urasyvyyttä.

Kuormitusajoneuvojen ajaessa vapaata ajolinjaa lähellä tien reunaa pysyvien siirtymien ero erosi urasyvyyden muutoksesta. Tämä johtunee siitä, että kuormitusajoneuvon ajaessa tien reuna-alueella, erityisesti tämä alue painuu alaspäin ja urasyvyyden laskennallisen referenssilangan toinen reuna on alempana, mikä johtaa pienempään urasyvyyteen.



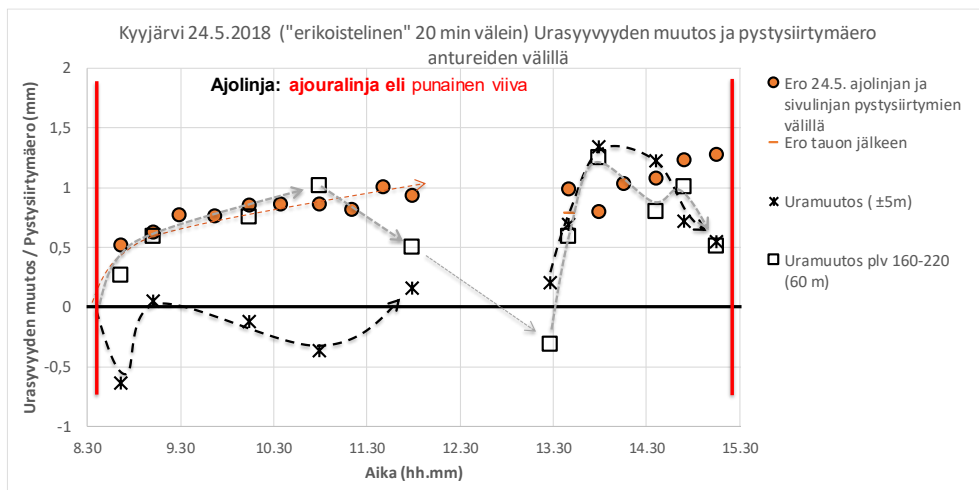
Kuva 66. Ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden ero ja laser-keilaimella määritetyt urasyvyyden muutokset 10 m ja 60 m pituisilta väleiltä ajan suhteen Kyyjärven kohteella 22.5.2018. Urasyvyysdataa oli vain iltapäivältä.

Kuvassa 67 on esitetty ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäanturien välinen pysyvän siirtymän ero ja eri tarkasteluväleiltä mitatut urasyvyyksien muutokset Kyyjärven koekohteella 23.5.2018. Aamupäivällä  $\pm 5$  m etäisyydeltä pystysiirtymäantureista mitatut urasyvyysmuutokset noudattelevat melko hyvin pystysiirtymäanturien siirtymäeroa, kun kuormitusajoneuvot ajoivat ajouralinjaa pitkin. Tarkasteluvälin plv 160-220 urasyvyyksiin ero oli suurempi. Vajaan kahden tunnin tauon aikana urasyvyys oli pienentynyt, mutta pysyvien siirtymien ero ei ollut pienentynyt. Iltapäivällä urasyvyyden muutos ja ero pystysiirtymäanturien pysyvissä siirtymissä lähenivät toisiaan, mutta sen jälkeen ero kasvoi merkittävästi. Aluksi ajolinjan vaihtuminen 0,65 m keskemälle tietä pienensi urasyvyyttä. Pystysiirtymäantureiden välinen tien pinnan pystysiirtymäero palautui ajolinjan muutoksella aamun lähtötasolle. Kuormitusajoneuvojen viimeisen ylityksen vapaa ajolinja kulki läheltä tien keskilinjaa.



Kuva 67. Ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden ero ja laserkeilaimella määritetyt urasyvyyden muutokset 10 m ja 60 m pituisilta väleiltä ajan suhteen Kyyjärven kohteella 23.5.2018.

Kuvassa 68 on esitetty vertailuksi ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäanturien välin pysyvien siirtymien ero ja eri tarkasteluväleiltä mitatut urasyvyyden muutokset Kyyjärven kohteella 24.5.2018. Kuormitusajoneuvona oli 8-akselinen tukkirekka, jonka perävaunussa oli erikoisrakenteinen viimeinen teli. Kolmiakselisen telin alla oli kaksi lisäakselia, joiden paripyörät olivat rekan keskiliinjalla. Kuormitusajoneuvo ajoi koko päivän ajouralinjaa. Aamupäivällä  $\pm 5$  m etäisyydeltä pystysiirtymäanturista mitatut urasyvyydenmuutokset eivät seuranneet pystysiirtymäanturien siirtymäeroa, koska ensimmäisen ylityksen jälkeen urasyvyyden muutos oli erisuuntainen kuin siirtymäero. Toisaalta tarkasteluvälillä plv 160–220 urasyvyyden muutos oli pääosin lähellä pystysiirtymäantureiden pysyvien siirtymien eroa. Tauon aikana plv 160–220 m urasyvyys pieneni, mutta muilla tarkastelutavoilla tauon aikana ei tapahtunut kuin pieniä muutoksia. Iltapäivällä urasyvyyksien muutokset ja ero pystysiirtymäanturien pysyvissä siirtymissä lähenivät toisiaan, mutta viimeisen ylityksen jälkeen ero oli noin 0,8 mm. Erikoistelisellä perävaunulla kuormitettaessa urasyvyyden muutokset olivat suuria  $\pm 5$  m etäisyydellä pystysiirtymäantureista.

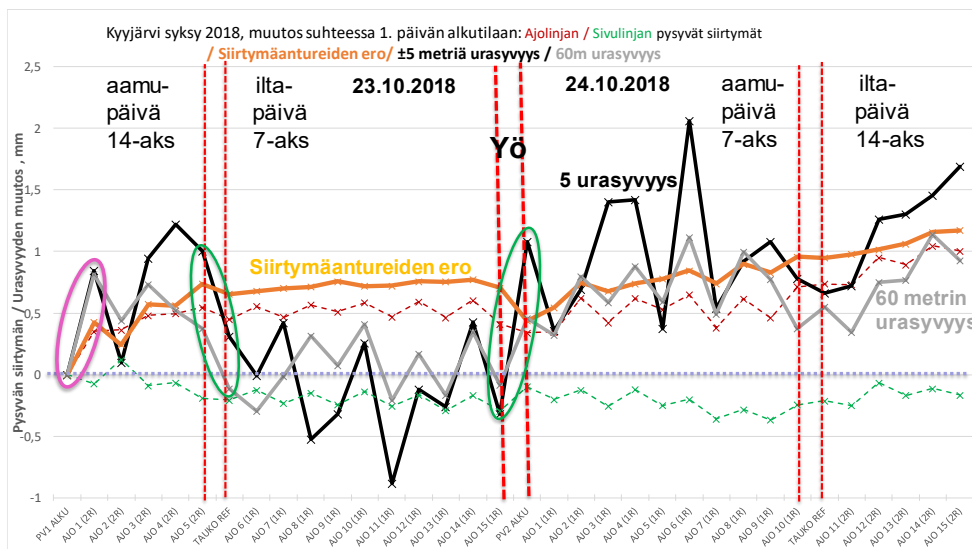


Kuva 68. Ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden ero ja laserkeilaimella määritetyt urasyvyyden muutokset 10 m ja 60 m pituisilta väleiltä ajan suhteen Kyyjärven kohteella 24.5.2018.

#### 4.2.7.3 Syksy 2018

Kuvassa 69 on esitetty ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäanturien välinen tien pinnan pysyvä siirtymäero ja eri tarkasteluväleiltä määritetyt urasyvyyden muutokset Kyyjärven koekohteelta syksyllä 2018. Kuormitusajoneuvo ajoi koko päivän ajouralinjaa. Aamupäivällä 23.10.2018 ajoi kaksi 7-akselista rekkaa peräkkäin 40 minuutin välein ja iltapäivällä yksi 7-akselinen rekka 20 minuutin välein. Seuraavana päivänä kuormitusjärjestys oli päinvastainen. Kuvasta nähdään  $\pm 5$  m etäisyydeltä pystysiirtymäantureista mitattujen urasyvyyksien muutosten vaihtelevan eniten (musta viiva). Tarkasteluvälillä plv 160–220 urasyvyyden (harmaa viiva) vaihtelu oli pienempää, mutta urasyvyyksien muutosten trendit olivat samanlaiset. Pystysiirtymäantureilla mitattu pysyvien siirtymien ero vaihteli huomattavasti vähemmän.

Kuvassa 69 on mielenkiintoista urasyvyyden selkeät muutokset 23.10.2018 päivällä pidetyn tauon aikana sekä mittauspäivien välisenä yönä (vihreät ellipsit). Sinänsä ensimmäisenä aamupäivänä kahden 7-akselisen rekan ajaessa peräkkäin pystysiirtymäantureiden ero oli samaa suuruusluokkaa kuin mitatut urasyvyyksien muutokset. Iltapäivällä ne erosivat toisistaan urasyvyyksien pienentyessä ja siirtymäantureiden eron pysyessä lähes samana. Toisena mittauspäivänä varsinkin tarkasteluvälin plv 160–220 urasyvyys ja siirtymäantureiden ero olivat samaa suuruusluokkaa. Laserkeilaimella mitatut urasyvyyksien muutokset lyhyellä  $\pm 5$  m matkalla saattoivat olla huomattavia yhdellä ylityksellä.



Kuva 69. Ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden ero ja laserkeilaimella määritetyt urasyvyyden muutokset 10 m ja 60 m pituisilta väleiltä ajan suhteen Kyyjärven kohteella syksyllä 2018.

#### 4.2.8 Yhteenveto Kyyjärven kohteen kuormituskokeista

- Toukokuussa 2018 turvepohjamaalla sijainnut 30–40 mm päällysteellä oleva noin 0,6 m paksuinen tierakenne ja pohjamaa tiivistyivät huomattavasti kuormitusrekkojen ylitysten tiivistäessä roudan löyhdyttämiä kerroksia. Lisäksi lämpimät ja aurinkoiset päivät kuivattivat tietä muuttaen koekohteen olosuhteita entisestään. Näiden kahden tekijän vuoksi peräkkäisinä päivinä tehtyjen kuormitusten tulokset eivät olleet lähtökohdiltaan tasavertaisia keväällä 2018.

- Lokakuussa 2018 kahtena päivänä kaksi peräkkäin 40 minuutin välein ajavaa 7-akselista rekkaa aiheuttivat suuremmat urasyvyyden kasvut kuin 7-akselinen rekka ajaessaan 20 minuutin välein koekohteen yli, kun tarkasteluväli oli plv 160-220 ja  $\pm 5$  metrin matka pystysiirtymäantureista. Tulos oli sama tarkasteltaessa ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden välistä tien pinnan pysyvien pystysiirtymien eroa. Kumpanakin kuormituspäivänä koekohteen ylitse ajettiin sekä 14- että 7-akselisella kuormitusajoneuvoyhdistelmällä.
- Keväällä 2018 ajolinjan muutoksella kyettiin pienentämään urasyvyyttä kaikkien mittaustapojen perusteella ensimmäisenä kuormituspäivänä. Toisena kuormituspäivänä urasyvyydet pienenevät ensimmäisellä muutuneen ajolinjan ylityskerralla, mutta toisella ylityksellä urasyvyydet kasvoivat. Tien pinnan pysyvien pystysiirtymien ero pystysiirtymäantureiden kohdalla palautui kuitenkin lähtötasolle.
- Ajosuunta ja tien kaarevuus mittauspistettä lähestyttäessä vaikuttivat selkeästi toteutuneeseen ajolinjaan.
- Kahden peräkkäin ajaneella 7-akselisella rekalla ajolinjojen vaihtelu oli suurempi kuin yksinään ajaneella 7-akselisella rekalla.
- Vuoden 2018 kuormituksissa ei havaittu kosteuden muutoksia.

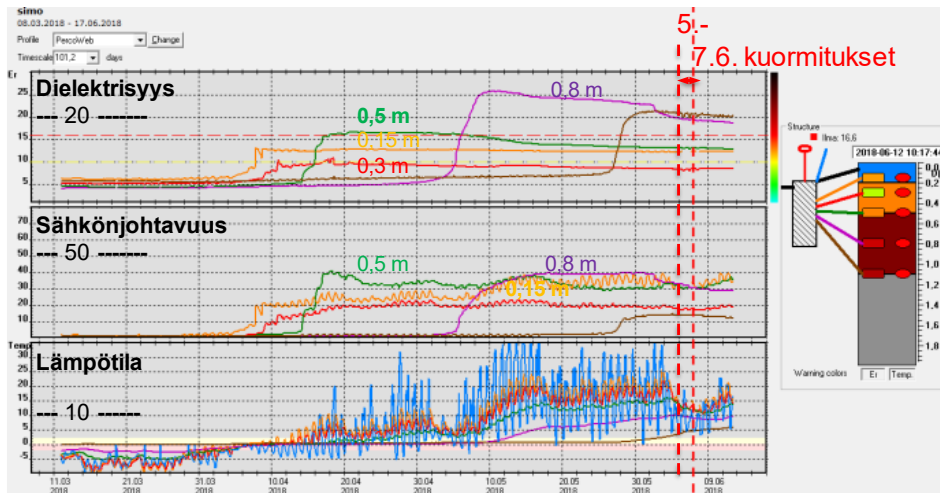
## 4.3 Mt 924 Simo – kevät 2018

### 4.3.1 Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet

Simon kohteella päällysteen paksuus oli noin 110 mm, päällysrakenteen kokonaispaksuus noin 0,6 m ja pohjamaa silttistä hiekkaa, hienoa hiekkaa tai silttiä. Yksi lähimmistä sääasemista oli Ranuan lentokentällä noin 40 km itään Simon koekohteesta. Ennen mittauksia oli yli 3 viikkoa sateetonta lukuun ottamatta pientä sadetta 3. ja 4.6.2018. Ennen mittauksia alueen 26 vuorokauden keskimääräinen keskilämpötila oli 12,7 °C sekä keskimääräiset ylimmät ja alimmat lämpötilat olivat 19,7°C ja 4,5 °C. Mittauspäivinä 5.–7.6.2018 keskilämpötilat olivat selkeästi alhaisempia, kun keskimääräinen keskilämpötila oli 5,6 °C sekä keskimääräiset ylimmät ja alimmat lämpötilat olivat 10,3°C ja 2,9 °C. Viimeinen mittauspäivä oli kylmin. (Ilmatieteen laitos, 2019)

Kuvassa 70 on esitetty mitatut dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvot sekä lämpötilat maaliskuun puolesta välistä kesäkuun puoliväliin vuodelta 2018. Kuvasta nähdään tierakenteen sulaneen 0,5 m syvyyteen huhtikuun puolivälissä ja 1,1 metriin touko-kesäkuun vaihteessa, kun syvimmän anturin lämpötila kohosi selkeästi yli 0 °C. Simon alueella lämmin kevät alkoi toukokuun alkupuolella, ja tierakenteen yläosan lämpötilat nousivat noin 20 °C toukokuun puolivälissä. Kuitenkin yli kahden viikon lämpimänä ajanjaksona pohjamaan lämpötila kohosi hitaasti ja 0,8 m syvyyden dielektrisyys pieneni hitaasti sähkönjohtavuuden pysyessä pitkälti samana, mikä johtuu roudan sulamisen syvemmältä vapauttamasta kosteudesta. Vasta 1,1 m syvyydessä olevan anturin lämpötilan noustessa selkeästi yli 0 °C 0,8 m dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvot pienenivät selkeästi. Kaikkineen tierakenteen ja pohjamaan dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvot pienenivät ennen mittauspäiviä lukuun ottamatta 0,15 m syvyyden sähkönjohtavuusarvon hienoista kasvua. Tämä tarkoitti, että tierakenteen kuivuessa pitkän ajan kuluessa tierakenne lujittui ollen todennäköisesti normaalihevättä paremmassa kunnossa. Edellisenä vuonna sulamisaika oli ollut Simon kohteella selkeästi pitempi. Mittausten aikana oli pääsääntöisesti pilvistä

päivälämpötilojen ollessa alle 10 °C, mutta viimeinen mittauspäivä oli kylmempi ja sitä haittasivat sadekuurot.

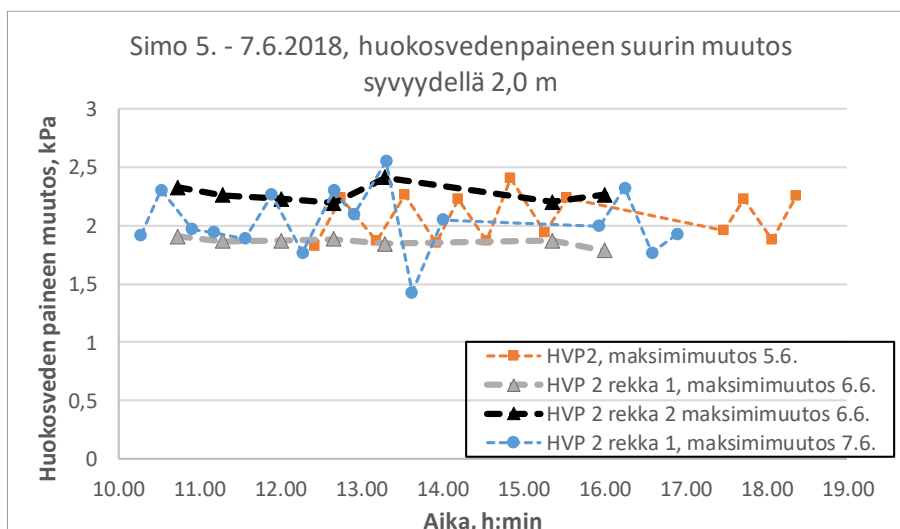


Kuva 70. Simon Percoasemalta mitatut tierakenteen ja pohjamaan dielektrisyysarvot, sähkönjohtavuudet ja lämpötilat keväällä 2018.

#### 4.3.2 Dielektrisyys- ja huokosvedenpaineen mittaukset

Dielektrisyttä mitattiin 0,15 m, 0,25 m, 0,45 m ja 0,65 m syvyyksiltä. Kuormituspäivinä 5.–7.6.2018 ei havaittu muutosta dielektrisyystasoissa eikä ylitysten välillä muutoksia mittausvasteissa. Ainoastaan viimeisenä kuormituspäivänä 7.6.2018 lähimpänä pintaa olevassa anturissa havaittiin hieman kasvua, mutta se johtui hyvin todennäköisesti kuurosateista.

Huokosvedenpainetta mitattiin 1,5 m ja 2,0 m syvyydeltä. Kuvassa 71 on esitetty 2 m syvyydessä olevan anturin mitaamat suurimmat huokosvedenpaineen muutokset ylityksen aikana. Muutos ylityksellä oli noin 2 kPa, mikä oli samaa suuruusluokkaa kuin vuonna 2017. Syvyyden 1,5 m huokospaineanturista mitattu suurin muutos oli 0,3 kPa ja on oletettavaa, että kyseisellä syvyydellä maapohja ei ollut kyllästynyt mittausten aikana.



Kuva 71. Huokosvedenpaineen muutokset 2,0 m syvyydellä ylitysten aikana.

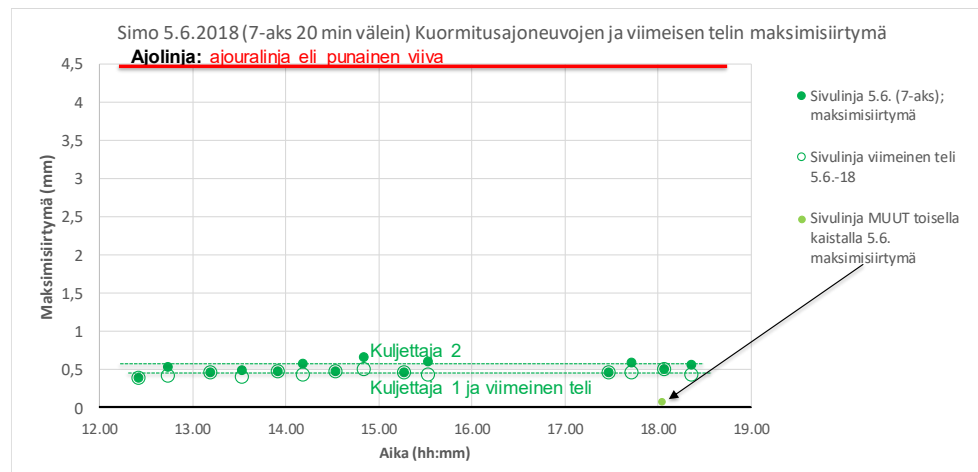


### 4.3.3 Päällysteen alapinnan pystysiirtymät

#### 4.3.3.1 Kevät 5.6.2018 - yksi kuormitusajoneuvo

Keväällä 2018 kuormitusajoneuvot ajoivat kahtena ensimmäisenä mittauspäivänä ajouran kohdalle sijoitettua ajouralinjaa (punainen viiva) pitkin. Tavoitteena oli, että ohjaukselin pyörä kulkisi keskellä tiehen merkittyä viivaa. Kuvassa 9 (sivu 22) on näytetty pistemäisten mittausantureiden sijainnit. Ajourassa olevaa pystysiirtymäanturia on kutsuttu ajouralinjan anturiksi ja siitä 0,5 m kesemmälle tietä asennettua anturia sivulinjan anturiksi. Keväällä 2018 Simon ajouralinjalla oleva pystysiirtymäanturi ei ollut enää lineaarisella mitausalueella roudan löyhdyttämän tierakenteen ja pohjamaan tiivistyttyä raskaan liikenteen alla ja sen mittaustulokset eivät siksi olleet käyttökelpoisia.

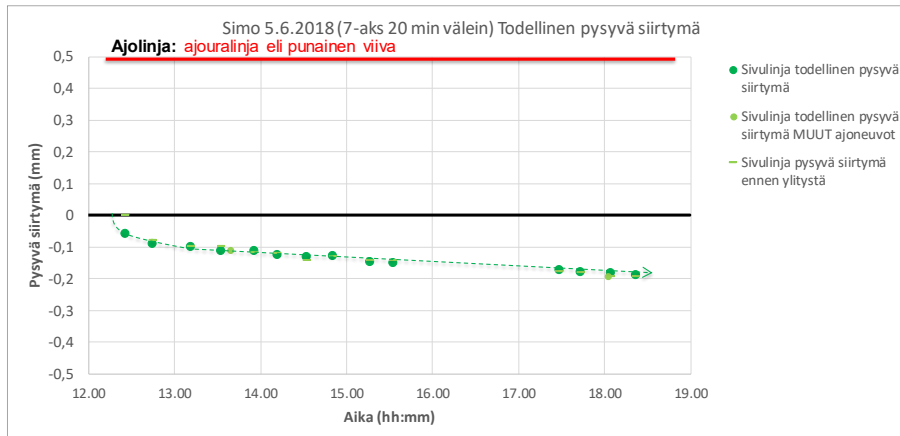
Kevään 2018 ensimmäisenä mittauspäivänä Simon mittausaluetta kuormittivat lähes identtiset 64 tonnoin painoiset 7-akseliset tukkirekat vuoron perään 20 minuutin välein samaan suuntaan ajaen. Mittauspäivän aikana ajokaista oli suljettu muulta liikenteeltä. Kuvassa 72 on esitetty 5.6.2018 tapahtuneiden kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat maksimisiirtymät ja kunkin ylityksen viimeisen telin aiheuttamat päällysteen pystysiirtymät sivulinjan pystysiirtymäanturin kohdalla. Kuormitusajoneuvojen ajaessa ajouralinjaa ylitysten aiheuttamat maksimisiirtymät sivulinjalla olivat 0,4–0,6 mm. Todennäköisesti kuljettajien ajolinjat erosivat hieman, koska periaatteessa samanlaisella rekalla maksimisiirtymät sivulinjalla olivat erisuuruiset joka toisella ylityksellä. Viimeisen telin aiheuttama maksimisiirtymä sivulinjalla oli noin 0,4 mm kun kuormitusajoneuvo ajoi ajouralinjaa pitkin. Kuvaan on merkitty esimerkiksi toisella kaistalla ajaneen muun rekan aiheuttama hyvin pieni maksimisiirtymä sivulinjalla.



Kuva 72. Simon kohteella 5.6.2018 mitatut ylitysten maksimisiirtymät ja ylitysten viimeisen telin aiheuttamat suurimmat pystysiirtymät sivulinjan pystysiirtymäanturin kohdalla.

Kuvassa 73 on esitetty kuormitusajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät sivulinjan siirtymäanturin kohdalla kuormitusajoneuvojen ajaessa pitkin ajouralinjaa, joka oli noin 0,6 m etäisyydellä sivulinjan anturista. Kuormitusajoneuvojen kulkiessa ajouralinjaa (punainen viiva) pitkin tien pinnan pysyvä siirtymä sivulinjalla oli pieni ja päivän aikana tien pinnan taso nousi noin 0,2 mm sivulinjan pystysiirtymäanturin kohdalla. Ensimmäisten ylitysten jälkeen yhdellä ylityksellä ei juurikaan muodostunut pysyvää siirtymää. Koska vajaan

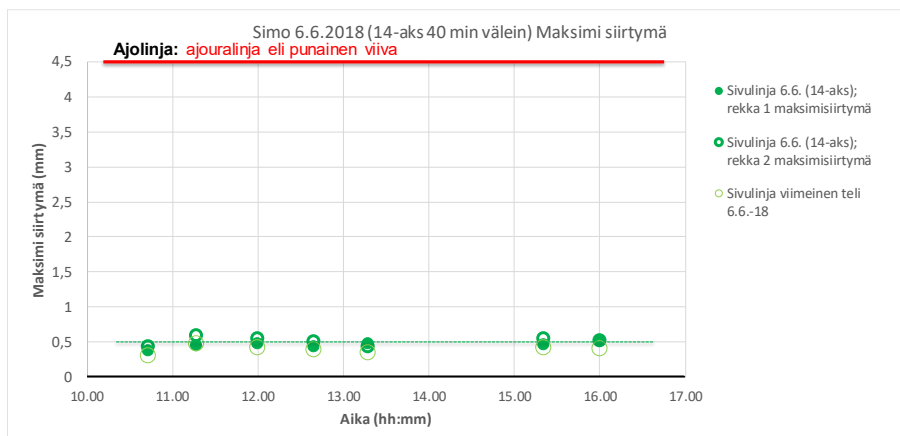
kahden tunnin tauon aikana tien pinta kohosi tasaisesti, todennäköisesti ensimmäisen ylityksen jälkeen viereisen kaistan liikenne vaikutti enemmän sivulinjan pystysiirtymäanturin tuloksiin. Kuormitusajoneuvojen viimeisen telin ajolinja vaihteli hyvin vähän eron ollessa suurimmillaan noin 0,15 m anturin kohdalla.



Kuva 73. Simon kohteella 5.6.2018 ajoneuvojen ylitysten jälkeen sivulinjan pystysiirtymäanturilla mitatut tien pinnan pysyvät siirtymät.

#### 4.3.3.2 Kevät 6.6.2018 - kaksi kuormitusajoneuvoa peräkkäin

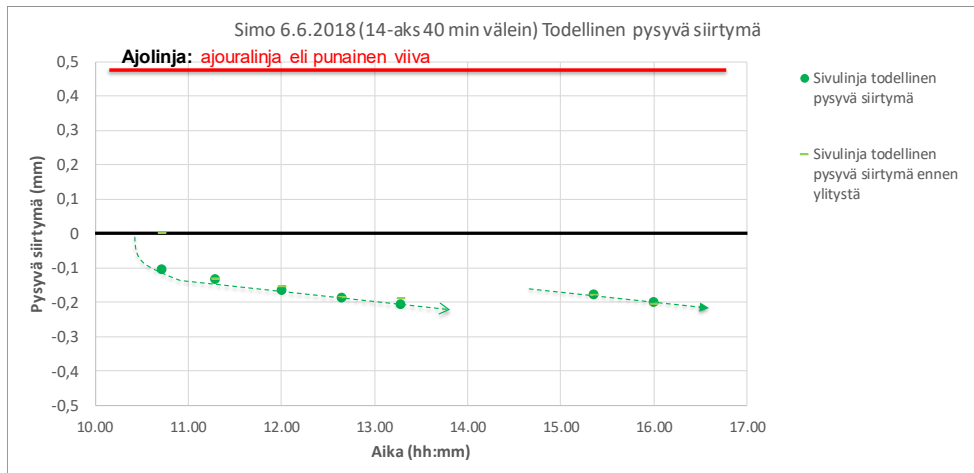
Kevään 2018 toisena mittauspäivänä Simon mittausaluetta kuormittivat 64 tonnin painoinen 7-akselinen tukkirekka ja 62 tonnin painoinen 7-akselinen sorarekka peräkkäin 40 minuutin välein samaan suuntaan ajaen. Mittauspäivän aikana ajokaista oli suljettu muulta liikenteeltä. Kuvassa 74 on esitetty 6.6.2018 tapahtuneiden kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat maksimisiirtymät ja viimeisen telin aiheuttamat päällysteen suurimmat pystysiirtymät sivulinjan pystysiirtymäanturin kohdalla. Kuormitusajoneuvojen ajaessa ajouralinjaa ylitysten aiheuttamat maksimisiirtymät sivulinjalla olivat 0,4–0,6 mm. Viimeisen telin aiheuttama maksimisiirtymä sivulinjalla oli yleensä hieman pienempi.



Kuva 74. Simon kohteella 6.6.2018 mitatut ylityksen ja viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät sivulinjalta.

Kuvassa 75 on esitetty kuormitusajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät sivulinjan siirtymäanturin kohdalla 6.6.2018 kuormitusajoneuvojen ajaessa pitkin ajouralinjaa, joka oli noin 0,6 m etäisyydellä sivulinjan anturista. Kuormitusajoneuvojen kulkiessa ajouralinjaa (punainen viiva) pitkin tien pinnan

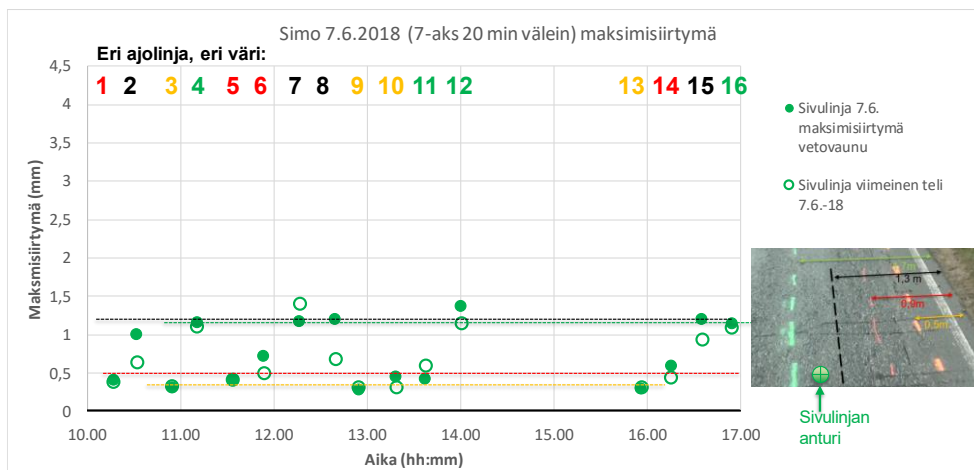
pysyvä siirtymä sivulinjalla oli pieni ja päivän aikana tien pinnan taso nousi noin 0,2 mm sivulinjan pystysiirtymäanturin kohdalla. Muutos oli yhtä suuri kuin edellisenä päivänä. Ensimmäisten ylityksen jälkeen yksittäisellä ylityksellä ei juurikaan muodostunut pysyvää siirtymää, joten ensimmäisen ylityksen jälkeen viereisen kaistan liikenne vaikutti todennäköisesti enemmän sivulinjan pystysiirtymäanturista mitattuihin pysyviin siirtymiin kuin kuormitusajoneuvojen ylitykset ajouralinjaa pitkin. Kuormitusajoneuvojen viimeisen telin ajolinjaa vaihteli vähän eron ollessa suurimmillaan noin 0,3 m anturin kohdalla.



Kuva 75. Simon kohteella 6.6.2018 ajoneuvojen ylitysten jälkeen sivulinjan pystysiirtymäanturilla mitatut tien pinnan pysyvät siirtymät.

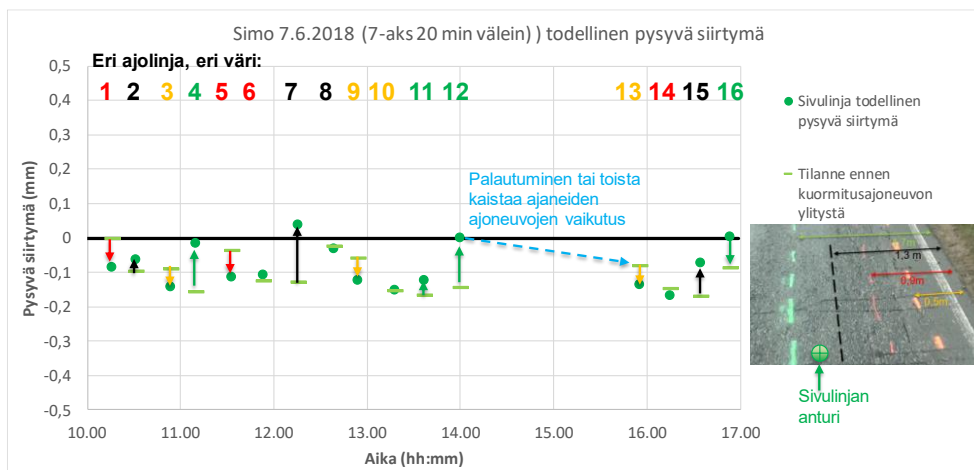
#### 4.3.3.3 Kevät 7.6.2018 - yksi kuormitusajoneuvo eri ajolinjoilla

Kevään 2018 kolmantena mittauspäivänä Simon mittausaluetta kuormittivat 64 tonnin painoinen 7-akselinen tukkirekka ja 62 tonnin painoinen 7-akselinen sorarekka ajaen 20 minuutin välein vaihtaen ajolinjaa ennalta sovitulla tavoilla ajosuunnan ollessa aina sama. Toteutunut ajosuunnitelma on esitetty liitteessä 2. Mittauspäivän aikana ajokaista oli suljettu muulta liikenteeltä. Kuvassa 76 on esitetty 7.6.2018 kuormitusajoneuvojen ylitysten ja viimeisen telin aiheuttamat päällysteen pystysiirtymät sivulinjalla. Kuormitusajoneuvojen ajaessa ajouralinjaa ylitysten aiheuttamat maksimisiirtymät sivulinjalla olivat 0,4–0,6 mm. Viimeisen telin maksimisiirtymä sivulinjalla oli yleensä hieman pienempi.



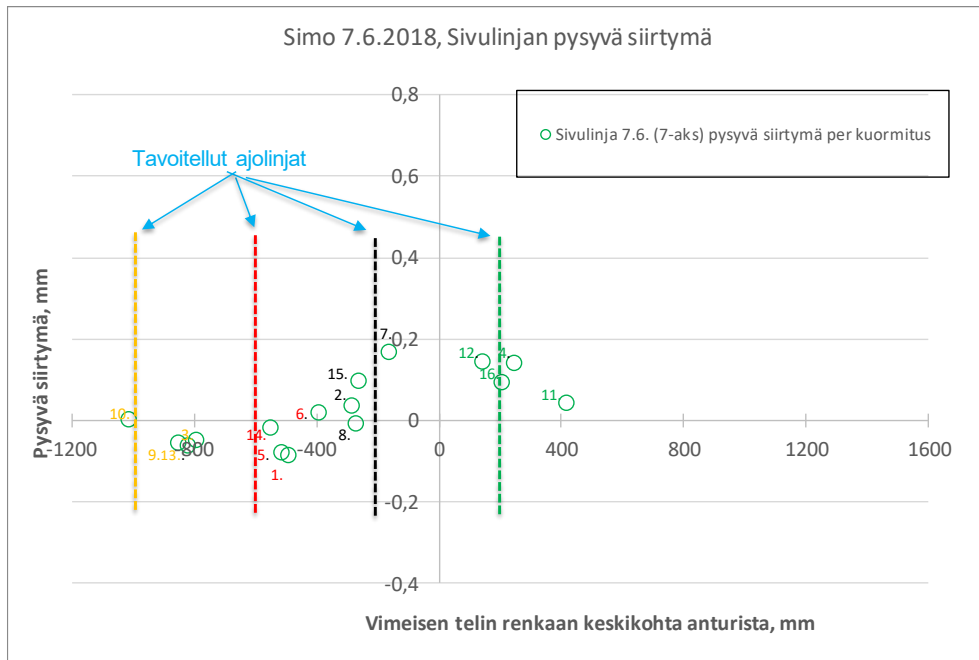
Kuva 76. Simon kohteella 7.6.2018 mitatut ylityksen ja viimeisen telin aiheuttamat maksimisiirtymät sivulinjalta.

Kuvassa 77 on esitetty kuormitusajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät sivulinjan siirtymäanturin kohdalla kuormitusajoneuvojen ajaessa eri ajolinjoja pitkin. Päivän lopussa tien pinta oli kohonnut noin 0,1 mm sivulinjan anturin kohdalla, kun päivän aikana kuormitusajoneuvojen ylitysten jälkeen se oli vaihdellut 0,15 mm kohoaman ja 0,05 mm painuman välillä. Vajaan kahden tunnin tauon aikana sivulinjan anturin kohdalla tien pinta kohosi noin 0,1 mm. Tämä johtui todennäköisesti enemmän toista kaistaa ajaneiden raskaiden ajoneuvojen (mm. kolme täyttä tukkirekkaa, kaksi 9-akselista rekkaa, 8-akselinen säiliörekka sekä 4- ja 5- akseliset rekat) vaikutuksesta kuin tie-rakenteen palautumisesta.



Kuva 77. Simon kohteella 7.6.2018 ajoneuvojen ylitysten jälkeen sivulinjan pystysiirtymäanturilla mitatut tien pinnan pysyvät siirtymät.

Kuvassa 78 on esitetty eri ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät sivulinjan pystysiirtymäanturilta. Enimmillään ylitys painoi tien pintaa 0,2 mm alaspäin ja kohotti 0,1 mm. Kuormitusajoneuvojen kulkiessa ajouralinjaa pitkin (punainen viiva) tai lähempänä tien reunaa (oranssi viiva) tien pinnan pysyvä siirtymä nosti sivulinjalla tien pinnan tasoa. Kuormitusajoneuvon renkaan keskikohdan kulkiessa noin 0,3 m etäisyydellä sivulinjan siirtymäanturista tien pinta painui sivulinjan anturin kohdalla. Kuormitusajoneuvon ajaessa toisen kerran samaa ajouralinjaa pitkin jälkimmäisen ylityksen aiheuttama pysyvä siirtymä oli pieni. Tästä poikkesi vihreän linjan ylitys, jossa ensimmäisen ylityksen ajolinja poikkesi tavoitellusta ajolinjasta yli 0,2 m. Kuvasta nähdään tavoiteltujen ajouralinjojen toteutuneen hyvin lukuun ottamatta lähimpänä tien reunaa ollutta ajouralinjaa, jossa yksi ylityksistä kulki viivaa pitkin ja kolme muuta noin 0,2 m keskeemmällä tiellä. Lisäksi punaisella ja vihreällä viivalla yksi ylitys poikkesi muista.

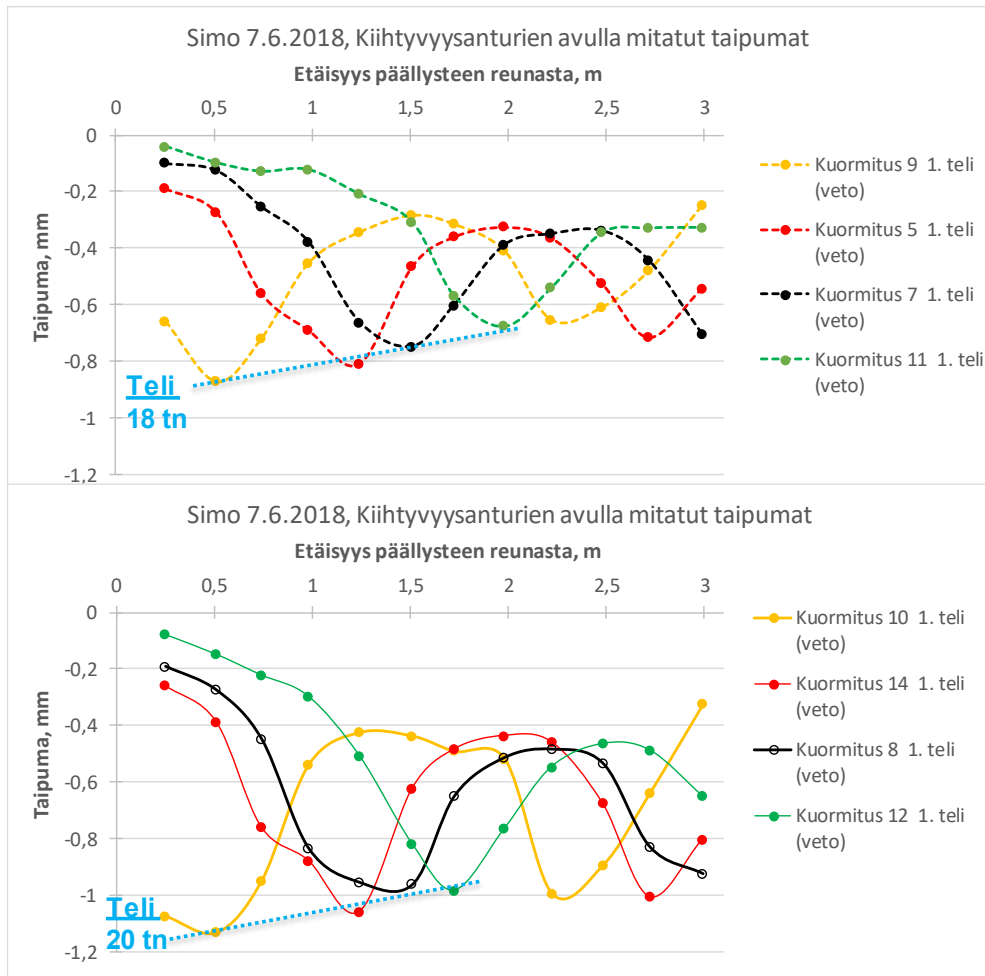


Kuva 78. Simon kohteella 7.6. mitattujen kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin sivusijaintiin.

#### 4.3.4 Kiihtyvyysantureiden perusteella mitattu päällysteen taipuma

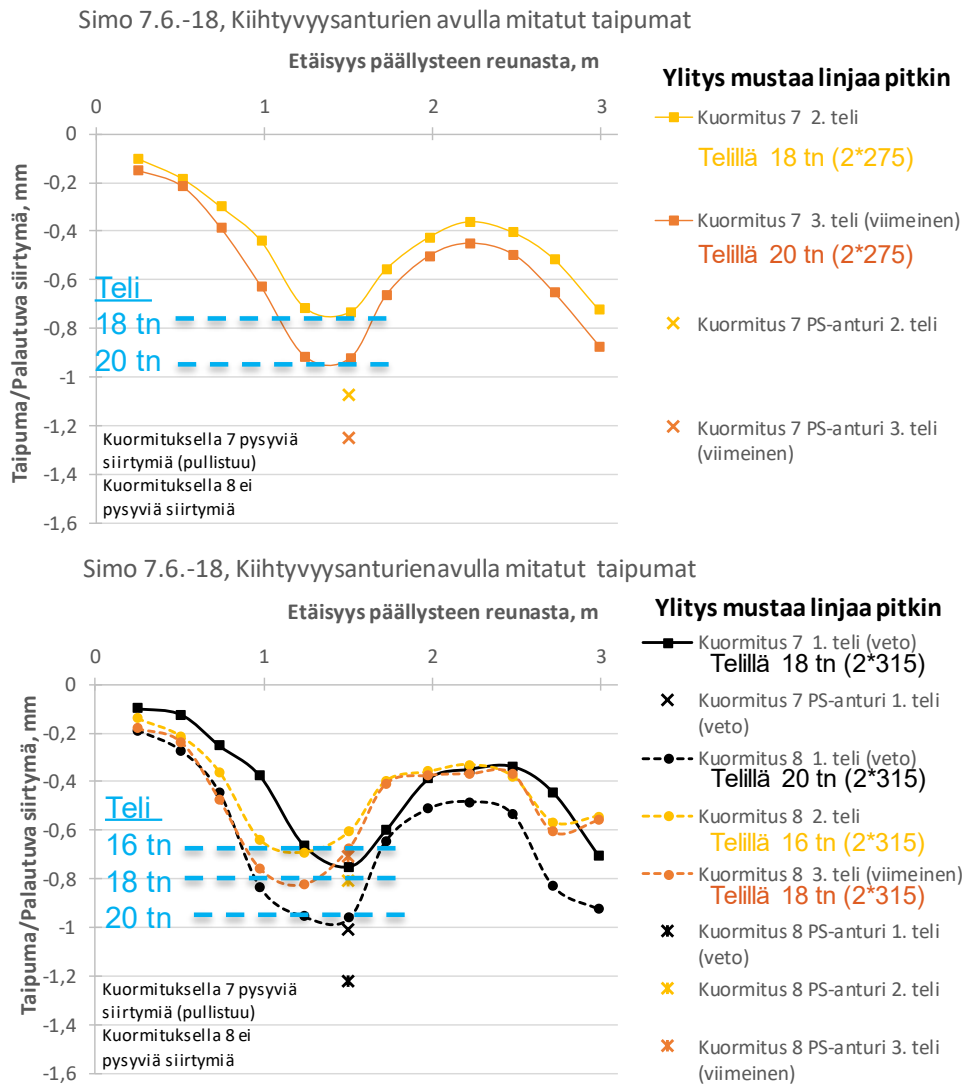
Kuvassa 79 on esitetty Simossa 7.6.2018 eri ajolinjoilla ajettujen kuormitusajoneuvojen ensimmäisen telin aiheuttamat, kiihtyvyysantureiden mittaus-tuloksista lasketut tien pinnan taipumat. Kuvassa ylempänä on parittomat ylitykset, joissa kuormitusajoneuvon telin massa oli 18 tonnia, ja alempana on parilliset ylitykset, joissa kuormitusajoneuvon telin massa oli 20 tonnia. Teleissä oli samanlaiset leveydeltään 315 mm paripyörät. Kuvan perusteella paripyörän alla taipuma on sitä pienempi, mitä keskemällä tietä ajolinja on ollut. Lisäksi taipumista havaitaan, että kahden tonnin massan lisäksi telillä kasvatti suurimpia taipumia lähes 0,3 mm eli 30–40 %.

Koska maksimitaipuma kasvaa raskaan ajoneuvon renkaan kulkiessa lähempänä tien reunaa, on todennäköistä, että pysyvät siirtymät olisivat suurempia lähellä tien reunaa. Jos raskaita ajoneuvoja ohjataan kulkemaan autonomisesti eri ajolinjoilla, olisi tutkittava tai arvioitava, kuinka lähellä tien reunaa niitä voi ohjata kulkemaan, jotta tien reuna-alue ei vaurioituisi muuta tien aluetta nopeammin.



Kuva 79. Simossa 7.6.2018 eri ajolinjoilla ajaneiden kuormitusajoneuvojen ensimmäisen telin aiheuttamat, kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksista lasketut tien pinnan taipumat. Ylempänä on parittomat ylitykset, joissa telin massa oli 18 tonnia. Alempana on parilliset ylitykset, joissa telin massa oli 20 tonnia. Teleissä oli samanlaiset leveydeltään 315 mm paripyörät.

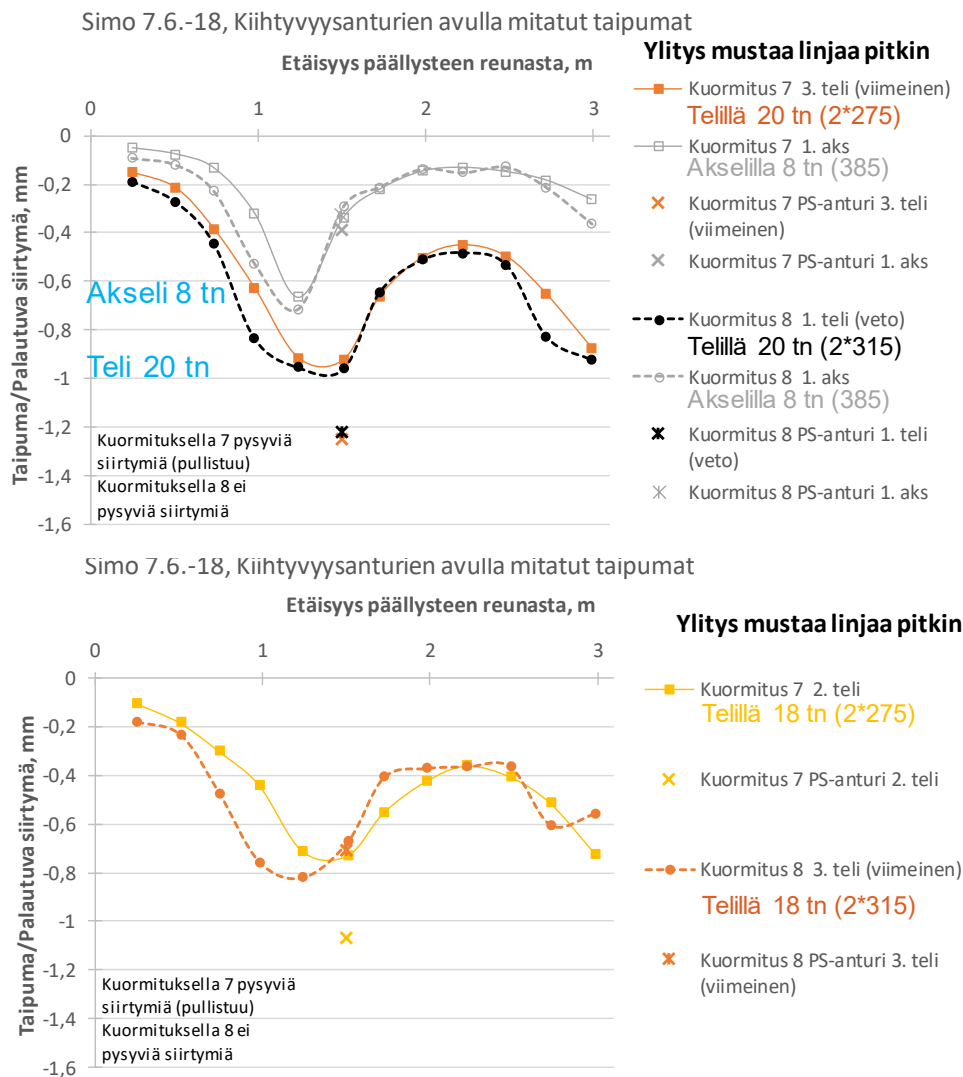
Kuvassa 80 on esitetty ylempänä leveydeltään 275 mm ja alempana leveydeltään 315 mm olevien paripyörien renkaiden aiheuttamat taipumat, kun telien massat ovat olleet 16, 18 tai 20 tonnia 7.6.2018 tehdyillä kuormituksilla 7 ja 8. Kuormituksella 7 tien pinta kohosi pystysiirtymäanturin kohdalla lähes 0,2 mm, mikä todennäköisesti johtaa kiihtyvyyssantureista lasketuissa taipumissa pienempiin arvoihin kuin pystysiirtymäantureista mitatuissa maksimisiirtymissä. Kuvasta nähdään selkeästi taipuman kasvu painon lisääntyessä ja lisäksi havaitaan alemmassa kuvassa kuormituksen 7 ajolinjan olleen eri kuin kuormituksen 8.



Kuva 80. Simossa 7.6.2018 kuormitusten 7. ja 8. ylitysten 275 mm ja 315 mm paripyörien renkailla varustettujen telien aiheuttamat taipumat kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksista laskettuna sekä siirtymäantureilla mitatut maksimipystysiirtymät.

Kuvassa 81 on vertailtu Simossa 7.6.2018 kuormitusten 7 ja 8 ylityksistä erilaisilla paripyörillä varustettujen telien aiheuttamia kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksista laskettuja taipumia, kun telien massat ovat olleet samat. Ylemmässä kuvassa telien massa on ollut 20 tonnia ja siinä on myös esitetty kuormitusajoneuvojen ensimmäisten akselien aiheuttamat taipumat. Alemmassa kuvassa telien massat ovat olleet 18 tonnia. Kuvassa on esitetty lisäksi pystysiirtymäantureista mitatut maksimisiirtymät. Kuvasta havaitaan, että kiihtyvyyksistä laskettujen taipumien perusteella maksitaipumat eivät eroa merkittävästi 275 mm ja 315 mm leveillä paripyörillä toisistaan. Sen sijaan pystysiirtymäantureista mitatut siirtymät olivat 275 mm levyisillä paripyörillä suuremmat kuin 315 mm levyisillä paripyörillä, mikä johtunee kapeamman paripyörän painopisteen osumisesta lähemmäksi pystysiirtymäanturia. Alemman kuvan 18 tonnin teleillä vaikuttaisi siltä, että 315 mm paripyörä ei ole kulkenut pystysiirtymäanturin päältä, mutta 275 mm paripyörä on kulkenut.



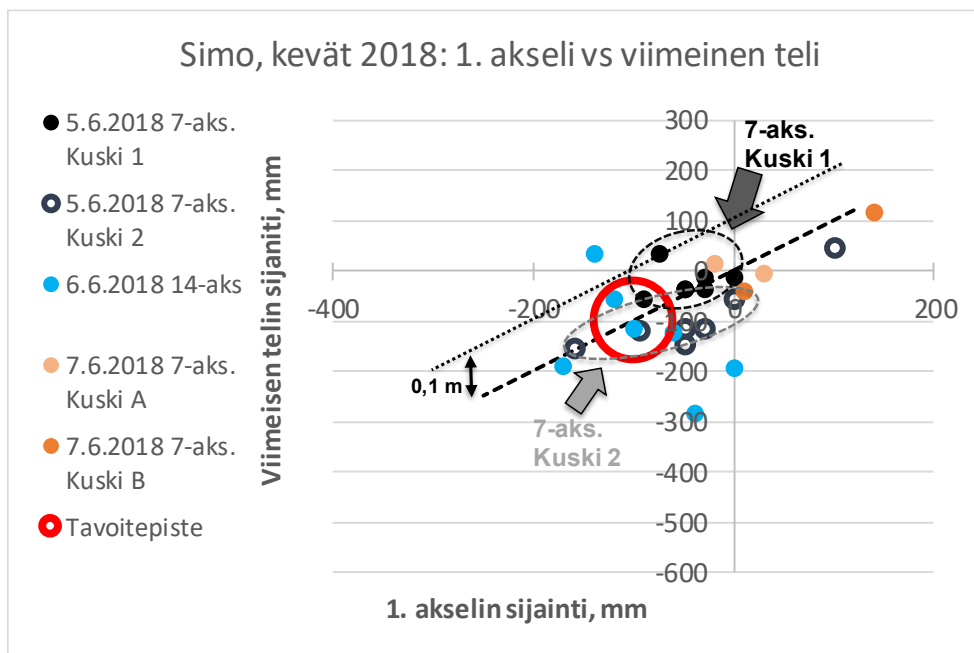


Kuva 81. Simossa 7.6.2018 7. ja 8. ylitysten 20 ja 18 tn painosten telien sekä ensimmäisen akselin aiheuttamista kiihtyvyyksistä lasketut päällysteen pinnan taipumat ja pystysiirtymäantureista mitatut tien pinnan maksimisiirtymät suhteessa päällysteen reunasta mitattuun etäisyyteen, kun telien paripyörien leveydet olivat 275 tai 315 mm.

#### 4.3.5 Ajolinjan sijainti etäisyyslaserilla

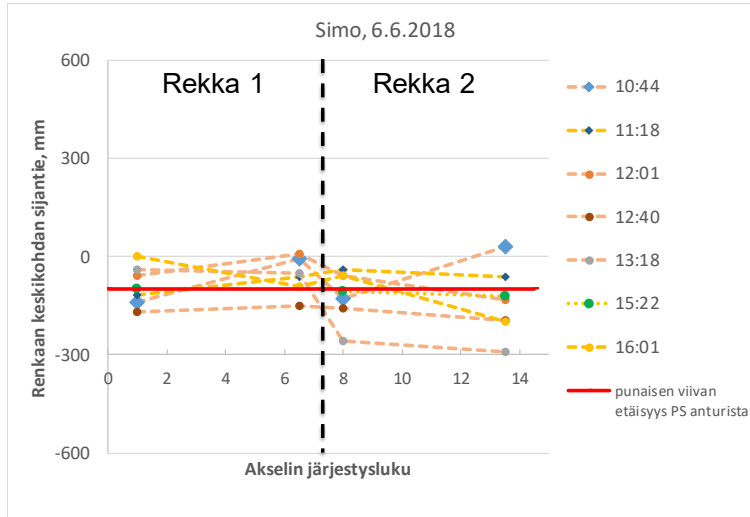
Kuvassa 82 on esitetty Simon kohteen kuormitusajoneuvojen ensimmäisen ja viimeisen telin sijainti suhteessa ajouralinjan pystysiirtymäanturiin, kun kuormitusajoneuvot ajoivat ajouralinjaa pitkin (punainen viiva) keväällä 2018. Kuormitusajoneuvon ajouralinja eli tiehen piirretty punainen viiva on merkitty kuvassa tavoitepisteenä. Jos kuvassa pisteet sijoittuvat katkoviivalle, kuormitusajoneuvon ensimmäisen akselin ja viimeisen telin renkaiden keskikohdat ovat kulkeneet samaa ajolinjaa pitkin. Mitä kauempana pallot ovat katkoviivasta, sitä enemmän viimeisen telin renkaat ovat ylityksen aikana eronneet ensimmäisen renkaan kohdasta eli kuormitusajoneuvossa renkaiden keskikohdat eivät ole koko pituudellaan samalla ajolinjalla. Koska renkaat olivat eri levyisiä renkaiden keskikohtien perusteella piirretty ajolinja ei ole sama suora kuin kuormitusajoneuvon kyljen tai renkaiden ulkoreunojen perusteella määritetty ajolinja (kuva 50). Kuvan 82 perusteella ensimmäisen ja viimeisen telin renkaiden

keskikohtien sijainnin ero pystysiirtymäantureiden kohdalla oli enimmillään 0,25 m. Periaatteessa mitä enemmän tiettyä kuormitusajoneuvon ylitystä vastaava piste eroaa tavoitepisteestä, sitä kauempana halutusta ajolinjasta kuormitusajoneuvo kulki. Enimmillään viimeinen teli erosi tavoitelluista ajolinjasta 0,2 m ja ensimmäinen akseli 0,25 m. Kuvasta 82 nähdään 5.6.2018 kuljettajan vaikuttaneen jonkin verran kuormitusajoneuvon ajolinjaan suhteessa haluttuun ajolinjaan. Kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon kulkiessa peräkkäin hajonta viimeisen telin kohdalla oli selkeästi suurempi kuin yksittäisten 7-akselisten kuormitusajoneuvojen ajouralinjoissa. Tosin 5. ja 7.6. yhden 7-akselisen kuormitusajoneuvon ajolinja poikkesi selvästi enemmän muista.



Kuva 82. Kuormitusajoneuvon ensimmäisen akselin ja viimeisen telin sijainti pystysiirtymäanturien kohdalla ajettaessa ajouralinjaa Simon koekohteessa keväällä 2018.

Kuvassa 83 on esitetty 6.6.2018 kahden peräkkäin kulkeneen 7-akselisen rekan ensimmäisten ja viimeisten telien sijainnit. Kuvasta havaitaan ensimmäisen kuormitusajoneuvon ensimmäisten telien olleen alle 0,2 m etäisyydellä toisistaan, mutta toisen rekan viimeisten telien olleen enimmillään 0,3 m etäisyydellä. Jos poistetaan ensimmäinen ja viides (klo 13:18) ylitys ero viimeisten telien kohdalla olisi 0,15 m. Viidellä ylityksellä seitsemästä kuormitusajoneuvot kulki-  
 vat siis hyvin ajouralinjaa pitkin.

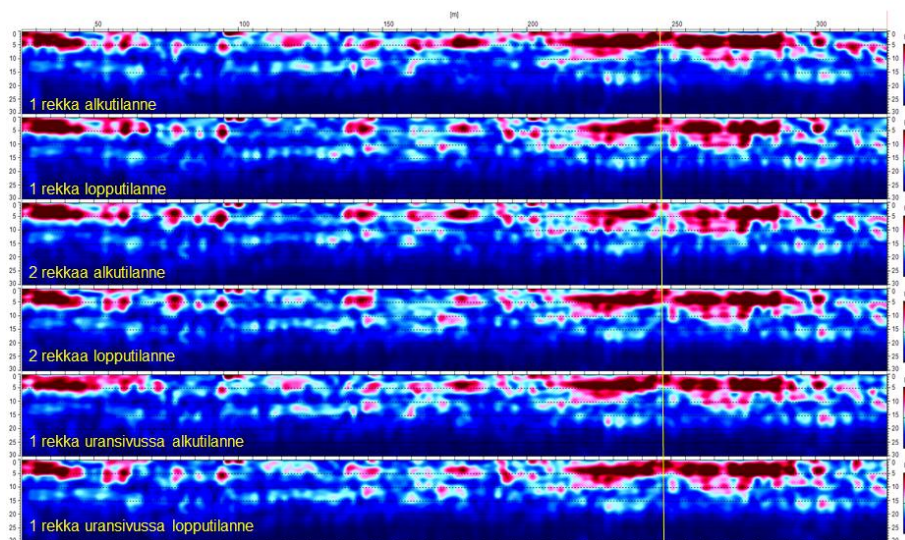


Kuva 83. Simossa 6.6.2018 kahden peräkkäin kulkeneen 7-akselisen rekan ensimmäisten akselien ja viimeisten telien sijainnit pystysiirtymäantureiden kohdalla haluttuun ajolinjaan nähden kuormitusajoneuvojen kulkiessa ajouralinjaa pitkin.

#### 4.3.6 Kosteuden muutokset maatulokamittauksella

Maatulokan 400 MHz:n antennidatasta lasketut kosteusprofiilikuvat on esitetty kuvassa 84. Kuvassa on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen kaikilta kolmelta mittauspäivältä. Kuvasta nähdään, että kosteusprofiilit ovat pysyneet lähes muuttumattomina, eivätkä kosteusolosuhteet tierakenteessa ole muuttuneet mainittavasti kuormitusten aikana. Pumpputumiseen viittaavaa kosteuden nousua rakenteessa ei siis havaita.

#### Simo kosteusprofiilit, kevät 2018

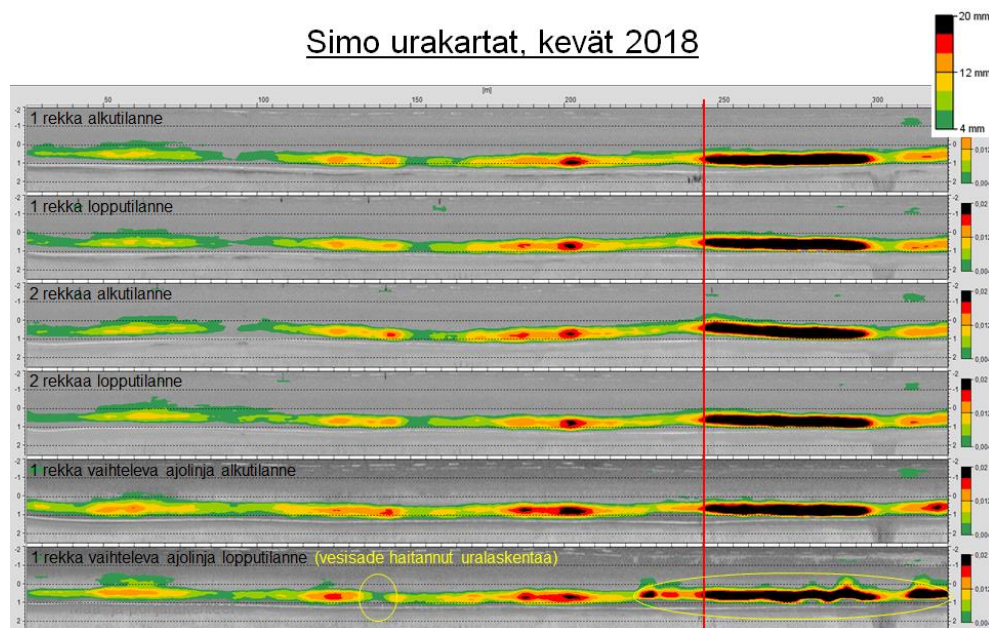


Kuva 84. Maatulokan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Simon kohteelta (Mt 924) keväältä 2018. Kuvassa on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen kolmelta peräkkäiseltä mittauspäivältä. Pystymittakaava on nanosekunti (ns), jossa yksi nanosekunti vastaa noin 6 cm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Percoaseman kohta on merkitty keltaisella pystyviivalla.

#### 4.3.7 Urautuminen laserkeilauksella

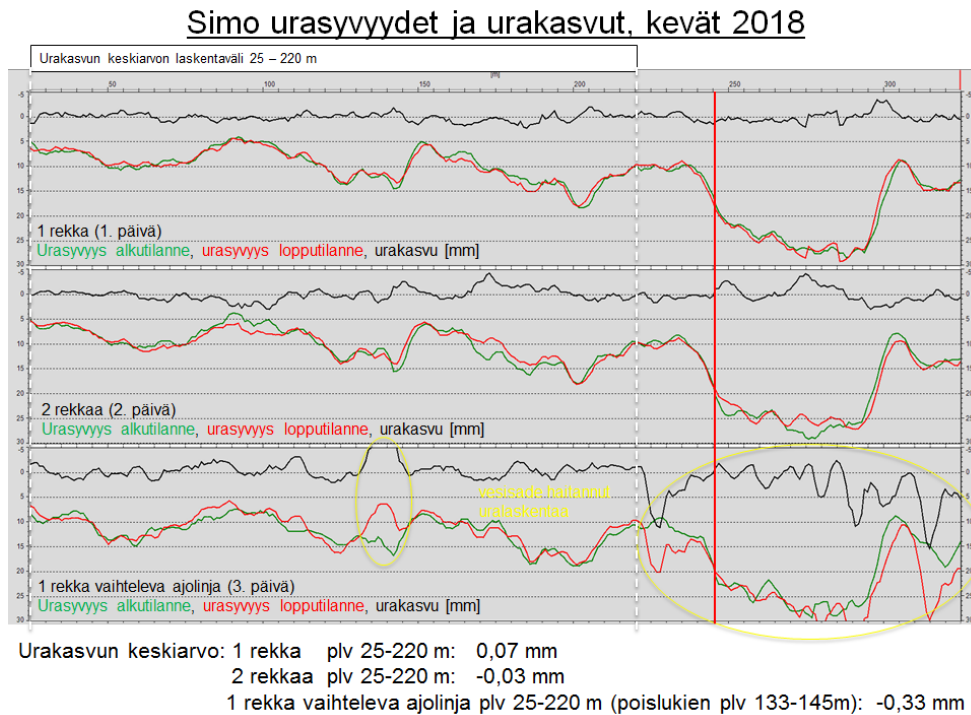
Kuvassa 85 on esitetty RDSV-urasyvyyskartat Simon (Mt 924) mittausjaksolta. Kuvassa on esitetty urasyvyyskartat ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen kaikilta kolmelta mittauspäivältä. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Percoaseman ja mittausantureiden sijainti on merkitty punaisella pystyviivalla.

Urakartoista ei havaita visuaalisesti merkittäviä eroja kuormituskerran alku- ja lopputilanteiden välillä. Viimeisenä mittauspäivänä laskentaa on haitannut lisäksi vesisade. Urakartoista nähdään edelleen rekan sivusuuntaisen heijaimisen (warping) vaikutus urautumiseen, kuten jo vuosien 2016–2017 tuloksista voitiin havaita. Warpingin takia tiehen on muodostunut melko tasaisin välein jaksottaisesti vaihtelevaa urautumista.



**Kuva 85.** RDSV-urasyvyyskartat Simon kohteelta (Mt 924) keväältä 2018. Kuvassa on esitetty urasyvyyskartat ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen kolmelta peräkkäiseltä mittauspäivältä. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Percoaseman kohta on merkitty punaisella pystyviivalla.

Kuvassa 86 on esitetty lisäksi maksimiurasyvyydet ja urakasvuarvot kuvaajina vastaavina ajankohtina kuin urasyvyyskartoissa. Urasyvyyskuvaajissa tilanne ennen kuormitusajoja on merkitty vihreällä ja tilanne viimeisen ajon jälkeen punaisella. Näiden erotus, eli urakasvu, on merkitty samaan kuvaajaan mustalla. Urakasvun keskiarvon laskentaväliksi on otettu paaluväli 25–220 m, jotta viimeisen päivän vesisateen aiheuttaman virheen vaikutus uralaskentaan jäisi mahdollisimman pieneksi ja eri päivien tuloksia voitaisiin vertailla keskenään. Ensimmäisenä päivänä yhdellä rekalla (14 x 7 akselia) urakasvun keskiarvo oli 0,1 mm ja seuraavana päivänä kahdella rekalla (7 x 14 akselia) 0,0 mm, eli käytännössä molempina päivinä nolla. Kolmantena päivänä vaihtelevalla ajo-  
linjalla ajaminen (16 x 7 akselia) pienensi keskimääräistä urasyvyyttä 0,3 mm.



Kuva 86. Maksimiurasyvyydet ja urakasvut Simon kohteelta keväällä 2018. Urasyvyyskuvaajissa tilanne ennen kuormitusajoja on merkitty vihreällä ja tilanne viimeisen ajon jälkeen punaisella. Näiden erotus, eli urakasvu, on merkitty samaan kuvaajaan mustalla.

#### 4.3.8 Yhteenveto Simon kohteen kuormituskokeista

- Kesäkuussa 2018 silttistä hiekkaa, silttiä tai hienoa hiekkaa olevalla pohjamaalla sijainnut noin 110 mm päällysteellä oleva noin 0,6 m paksuinen tierakenne ei urautunut 7-akselisen rekan ajaessa 20 minuutin välein eikä kahden 7-akselisen rekan ajaessa peräkkäin 40 minuutin välein.
- Ajolinjojen muutoksilla kyettiin pienentämään urasyvyyttä laserkeilaimella määritettyjen urasyvyysien perusteella 7.6.2018.
- Vuoden 2018 kuormituksissa ei havaittu kosteuden muutoksia.

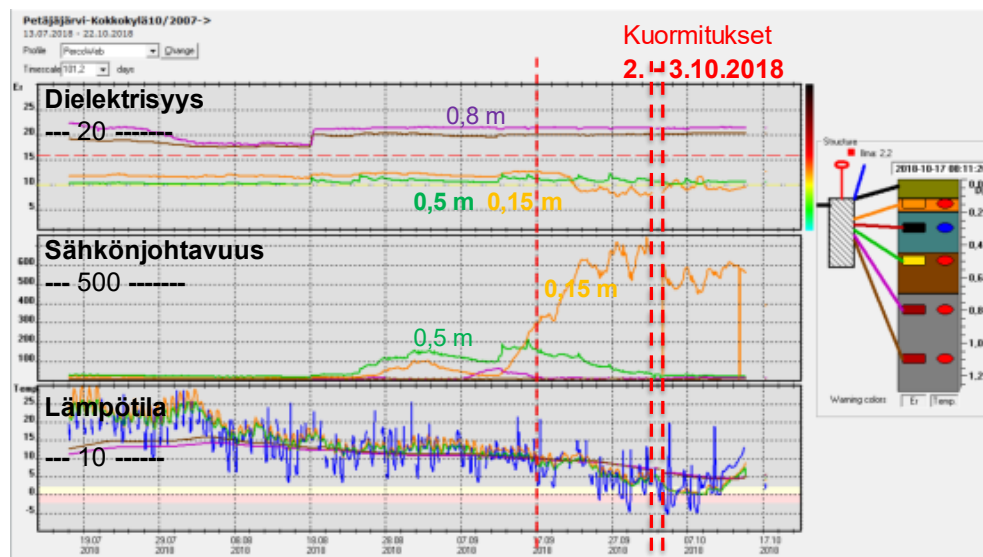
### 4.4 Mt 18824 Ranua – syksy 2018

#### 4.4.1 Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet

Ranuan soratiekohteen kulutuskerroksen paksuus oli noin 100 mm, päällysrakenteen kokonaispaksuus hieman alle 0,5 m ja pohjamaa turpeen sekaista silttimoreenia. Yksi lähimmistä sääasemista oli Ranuan lentokentällä noin 30 km pohjoiseen Ranuan koekohteesta. Ennen mittauksia oli kolmen viikon aikana satanut keskimäärin 2,4 mm vuorokaudessa keskimäärin joka kolmannen päivän ollessa kuitenkin sateeton. Ennen mittauksia alueen kolmen viikon keskimääräinen keskilämpötila oli 7,2 °C sekä keskimääräiset ylimmät ja alimmat lämpötilat olivat 11,8°C ja 2,9 °C. Mittauspäivinä 2.–3.10.2018 keskilämpötilat olivat selkeästi alhaisempia, kun keskimääräinen keskilämpötila oli 0,7 °C sekä keskimääräiset ylimmät ja alimmat lämpötilat olivat 4,6°C ja -2,8 °C. Jälkimmäinen mittauspäivä oli kylmempi. (Ilmatieteenlaitos, 2019)



Kuvassa 87 on esitetty mitatut dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvot sekä lämpötilat heinäkuun puolesta välistä lokakuun puoliväliin vuodelta 2018. Mittausten aikana dielektrisyys 0,15 m syvyydessä oli 8 eli hyvä. Koska syvyydessä 0,3 m ollut anturi oli rikki, seuraava dielektrisyysarvojen mittaussyvyys oli 0,5 m, jossa dielektrisyys oli hieman yli kymmenen. Syvimmät anturit olivat 0,8 m ja 1,1 m syvyydessä olivat ojan pohjan tason alapuolella, jossa pohjamaa oli märkää dielektrisyysarvon ollessa yli 20. Dielektrisyydet olivat muuten saman suuruisia kuin syksyllä 2016 tehtyjen kuormitusten aikana, paitsi että 0,15 m anturin lukemat olivat nyt pienempiä. Ranuan koekohde vaikutti olevan dielektrisyysarvojen perusteella paremmassa kunnossa syksyn 2018 koekuormitusten aikana kuin kaksi vuotta aiemmin syksyllä 2016. Kuvasta 87 nähdään myös tierakenteesta mitattujen sähkönjohtavuusarvojen kohoamisen ensimmäisen kerran elokuun loppupuolella. Tierakenteen pintaosassa sähkönjohtavuus nousi korkealle syyskuun puolivälissä ja pysyi korkeana kuormitusten aikana. Korkea sähkönjohtavuus indikoi pintakerroksen plastisoitumisen mahdollisuuden olevan tavanomaista suuremman. Syksyllä 2016 tehtyjen kuormitusten aikana sähkönjohtavuus oli ollut paljon pienempi Ranuan kohteella. Ensimmäisenä mittauspäivänä noin klo 13 satoi hyvin lyhyt ja kevyt sadekuuro, joka hieman kostutti tien pintaa. Muuten mittauspäivät 2. ja 3.10.2018 olivat poutaisia vaikka lähialueella kulki saderintamia jälkimmäisenä mittauspäivänä. Mittauspäivien välisenä yönä oli pakkasta, mikä aiheutti tien pinnan kostumista lämpötilan kohotessa. Yöpakkanen ei todennäköisesti kuitenkaan vaikuttanut mittaustuloksiin.



Kuva 87. Ranuan Percoasemalta mitatut tierakenteen ja pohjamaan dielektrisyysarvot, sähkönjohtavuudet ja lämpötilat syksyllä 2018.

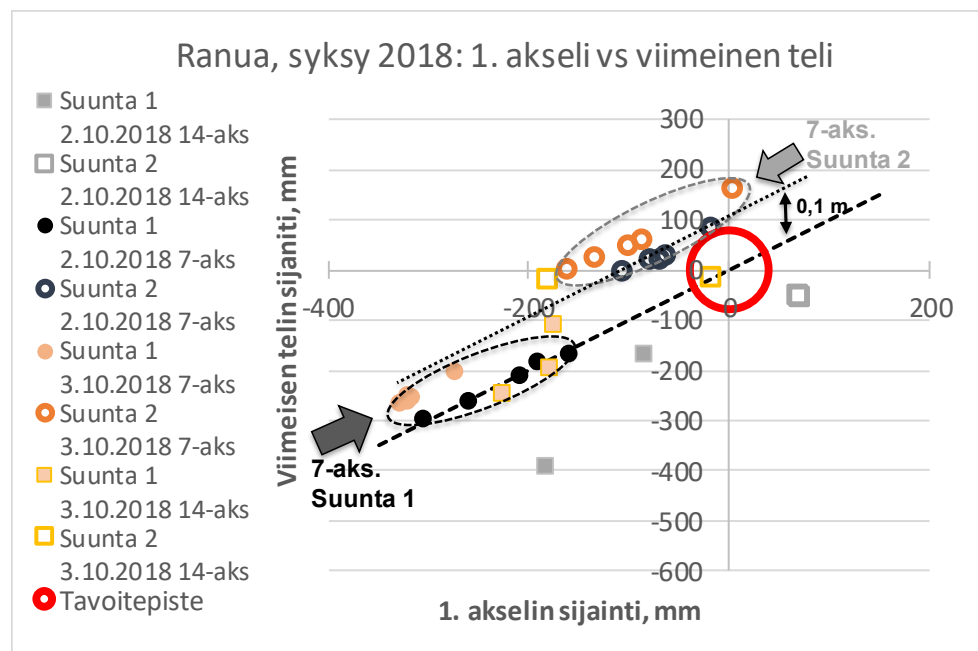
#### 4.4.2 Dielektrisyysarvojen mittaukset

Dielektrisyyttä mitattiin 0,15 m, 0,5 m, 0,8 m ja 1,1 m syvyyksiltä. Kuormituspäivinä 2.–3.10.2018 ei havaittu muutosta dielektrisyystasoissa eikä ylitysten välillä muutoksia mittaustuloksissa. Rekkojen ylityksissä niiden akselit eivät juurikaan näkyneet dielektrisyysarvoissa.

#### 4.4.3 Ajolinjan sijainti etäisyyslaserilla

Kuvassa 88 on esitetty Ranuan kohteen kuormitusajoneuvojen ensimmäisen ja viimeisen telin sijainti suhteessa ajouralinjaan, kun ne ajoivat ajouralinjaa pitkin syksyllä 2018. Ensimmäisen päivän kolmannen ylityksen (klo 11:35) mittausdatoja ei ole kyetty avaamaan käsittelyä varten. Kuormitusajoneuvon ajouralinja eli tiehen piirretty punainen viiva on merkitty kuvassa tavoitepisteinä. Jos kuvassa pisteet ovat katkoviivalla, kuormitusajoneuvon ensimmäisen akselin ja viimeisen telin renkaiden keskikohdat ovat kulkeneet samaa ajolinjaa pitkin. Mitä kauempana pallot ovat katkoviivasta, sitä enemmän viimeisen telin renkaiden keskikohdat ovat ylityksen aikana eronneet ensimmäisen renkaan keskikohdasta eli kuormitusajo ei ole kulkenut koko pituudellaan samaa ajolinjaa. Tosin on muistettava, että rekassa renkaiden keskikohta ei ole samalla linjalla rekan kyljen tai renkaiden ulkoreunojen kanssa (kuva 50).

Enimmillään ensimmäisen ja viimeisen telin renkaiden keskikohdan sijainnin ero pystysiirtymäantureiden kohdalla oli 0,2 m. Periaatteessa mitä enemmän kuormitusajoneuvon piste eroaa tavoitepisteestä, sitä kauempana halutusta ajolinjasta kuormitusajoneuvo kulki. Enimmillään viimeinen teli erosi tavoiteluista ajolinjasta 0,4 m ja ensimmäinen akseli 0,3 m. Kahden 7-akselisen kuormitusajoneuvon kulkiessa peräkkäin, hajonta oli suurempi kuin 7-akselisten kuormitusajoneuvojen ajouralinjoissa.

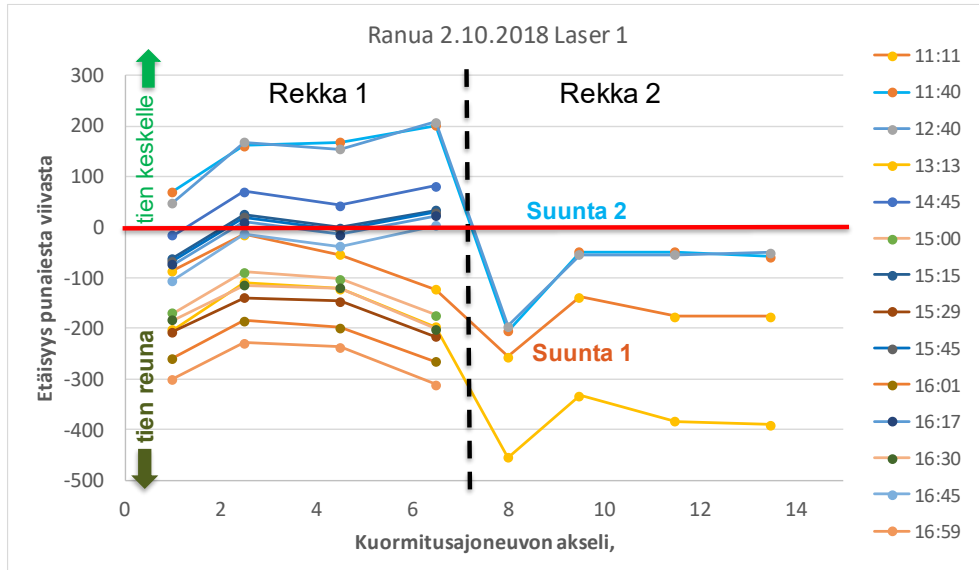


Kuva 88. Kuormitusajoneuvon ensimmäisen akselin ja viimeisen telin sijainti uralinjan pystysiirtymäanturin kohdalla Ranuan koekohteessa syksyllä 2018.

Kuvassa 89 on esitetty kuormitusajoneuvojen yksittäisakselien ja telien sijainnit mittauskohdassa Ranuan koekohteella 2.10.2018. Kuvasta havaitaan ajosuunnalla olleen selvä merkitys ajolinjalle osumiseen. Ajaessaan omalla kaistallaan suuntaan 1 kuormitusajoneuvot ovat ajaneet lähempänä tien reunaa kuin ajaessaan mittausalueella vastaan tulevien kaistaa pitkin. Ensimmäisen rekan ylityksillä ensimmäisen akselin kohdat erosivat toisistaan enintään 0,4 m, mutta samaan ajosuuntaan ajettaessa ero oli enää noin 0,15 m. Ensimmäisen rekan viimeisen telin kohdalla hajonta oli hieman suurempi, koska eri ajosuuntaan

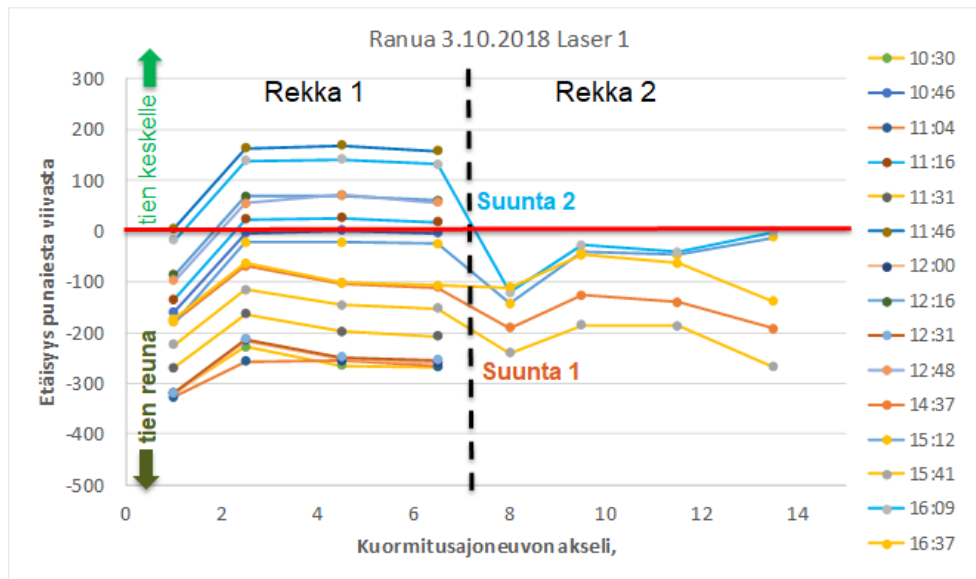


ajettaessa rekan perävaunu poikkesi ajolinjasta eri suuntiin. Ajosuunnan keskimääräinen vaikutus telin sijaintiin tien sivusuunnassa oli 0,2–0,3 m. Kahden rekan kulkiessa peräkkäin jälkimmäisen rekan ajolinja erosi enemmän edellä ajaneen rekan ajolinjasta ajosuuntaan 2 ajettaessa. Kuvaa katsoessa on muistettava, että pari- ja yksittäispyörien keskikohtat eivät ole rekassa samalla linjalla, jolloin ns. 14-akselisen kuormitusajoneuvon 7. ja 8. akselin renkaiden keskikohtien perusteella määritettyihin ajolinjoihin tulee poikkeamaa.



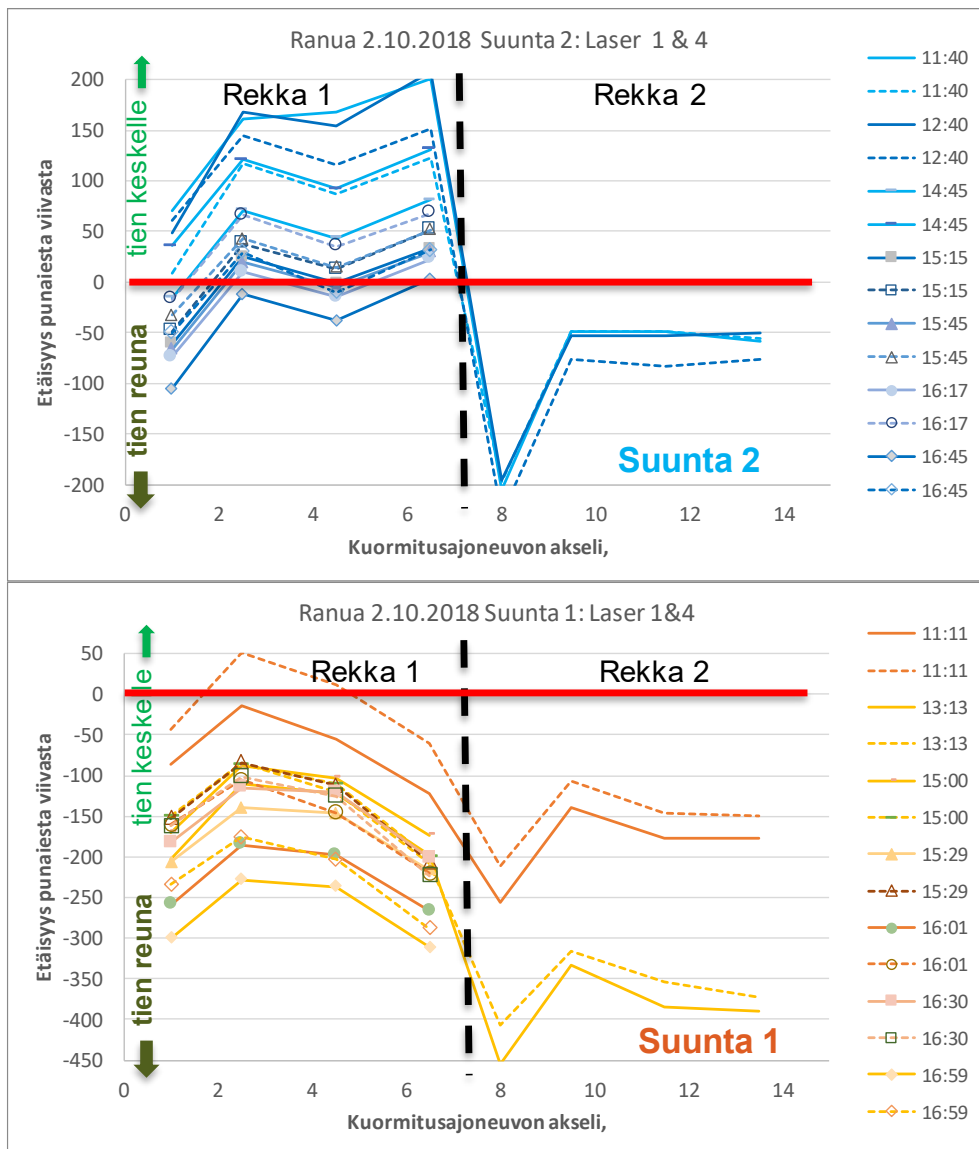
Kuva 89. Ranualla 2.10.2018 kuormitusajoneuvojen (7- ja 14-aks.) ensimmäisten yksittäisakselien ja telien pyörien keskikohtien sijainnit ajouralinjaan (punainen viiva) nähden eri aikoina.

Kuvassa 90 on esitetty kuormitusajoneuvojen yksittäisakselien ja telien sijainnit mittauskohdassa Ranuan koekohteella 3.10.2018. Kuvassa 90 havaitaan samat asiat kuin edellisen päivän kuvassa 89. Tosin 3.10.2018 hajonta kuormitusajoneuvojen ylitysten välillä sijainnin suhteen oli hieman pienempi. Erityisesti kahden rekan kulkiessa peräkkäin hajonta ajolinjan suhteen oli jälkimmäisellä rekalla paljon pienempi 3.10. kuin 2.10.2018. Kuitenkin 7- ja 14-akselisella ajoneuvoyhdistelmällä kaikkien telien renkaiden keskikohtat kulkivat molempina päivinä keskiarvoltaan samasta kohtaa noin 0,1 m punaisesta viivasta tien reunaa kohden. Kuormitusajoneuvojen viimeisen telin sijainnin osalta tilanne oli sama paitsi, että ensimmäisenä kuormituspäivänä 2.10.2018 14-akselisen ajoneuvoyhdistelmällä viimeinen teli kulki keskimäärin 50 mm lähempänä tien reunaa kuin muilla kuormitussarjoilla.



Kuva 90. Ranualla 3.10.2018 kuormitusajoneuvojen (7- ja 14-aks.) ensimmäisten yksittäisakselien ja telien pyörien keskikohtien sijainnit ajouralinjaan (punainen viiva) nähden eri aikoina.

Mittauksissa käytettiin myös toista etäisyyslaseria (Laser 4), joka sijaitsi noin 10 m päässä pystysiirtymäantureiden kohdalla sijainneesta etäisyyslaserista. Kuvassa 91 on esitetty samat mittaustulokset kuin kuvassa 89, mutta jaoteltuina ajosuunnittain ja lisättynä toisesta pisteestä mitatuilla katkoviivoilla merkityillä etäisyyslaserin tuloksilla. Jälkimmäisenä mittauspäivänä kauempana olleen Laser 4:n mittaustulokset olivat epäselvempiä ja vastaavaa kuvaajaa ei ole tehty 3.10.2018 mittauksista. Kuvasta havaitaan, että etäisyyslaserien tulokset olivat hyvin samanlaiset. Ensimmäisenä mittauspäivänä ajosuuntaan 1 Laser 4:n kohdalla ajolinja pysyi samalla etäisyydellä ajouralinjasta eli punaisesta viivasta tai kulki 14-akselisella kuormitusrekalla enimmillään 0,1 m keskemällä tietä kuin Laser 1:n kohdalla. Ajosuuntaan 2 Laser 4:n kohdalla ajolinja pysyi samalla etäisyydellä ajouralinjasta eli punaisesta viivasta 7-akselisella kuormitusrekalla enimmillään noin 0,05 m keskemällä tietä kuin Laser1:n kohdalla. Kahden 7-akselisen rekan ajaessa peräkkäin ajosuuntaan 2 Laser 4:n kohdalla ajolinja oli muista ylityksistä poiketen alle 0,1 mm lähempänä tien reunaa kuin Laser 1:n kohdalla.



Kuva 91. Ranualla 2.10.2018 kuormitusajoneuvojen telien ja yksittäis-akseleiden renkaiden keskikohdan sijainnit ajouralinjaan eli punaiseen viivaan nähden kahdessa kohdassa noin 10 m etäisyydellä toisistaan. Katkoviivalla on merkitty etäisyydet Laser 4:n kohdalla.

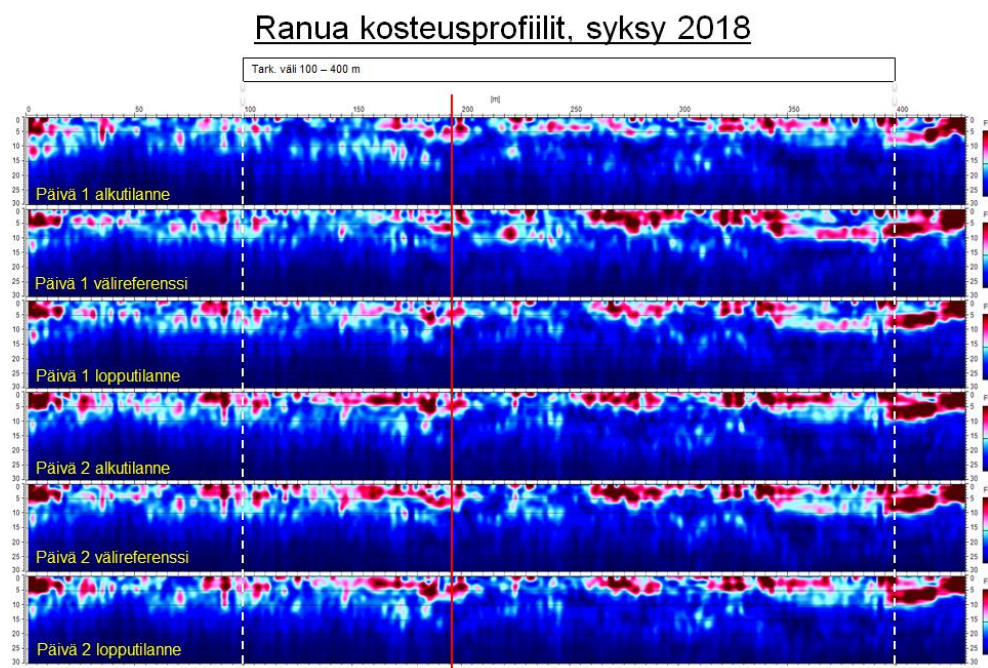
Kuvista 89-91 nähdään selkeästi, että kaksi 7-akselista rekkaa eivät onnistuneet ajamaan samaa ajolinjaa. Ainoastaan 3.10. suuntaan 1 ajettaessa peräkkäisten rekkojen ajolinjat olivat melko lähellä toisiaan. Kun kahden peräkkäin ajaneiden rekkojen ajolinjat eivät ole samoja, pitäisi niiden vaikutus urasyvyyden kasvuun olla pienempi kuin samaa ajolinjaa ajavien rekkojen.

#### 4.4.4 Kosteuden muutos maatutkauksella

Maatutkan 400 MHz:n antennidatasta laskettuja kosteusprofiileja syksyiltä 2018 on esitetty kuvassa 92. Ylimmässä kosteusprofiilissa on tilanne ennen kuormitusajoja eli ensimmäisen mittauspäivän alkutilanne. Seuraavassa kosteusprofiilissa on tilanne ensimmäisen päivän puolivälissä, kun aamupäivä ajot kahdella rekalla on ajettu, ennen iltapäivän ajoja yhdellä rekalla. Kolmannessa kosteusprofiilissa on tilanne ensimmäisen mittauspäivän päätteeksi.

Seuraavissa kolmessa kosteusprofiilissa on esitetty vastaavat tilanteet toisen mittauspäivän osalta.

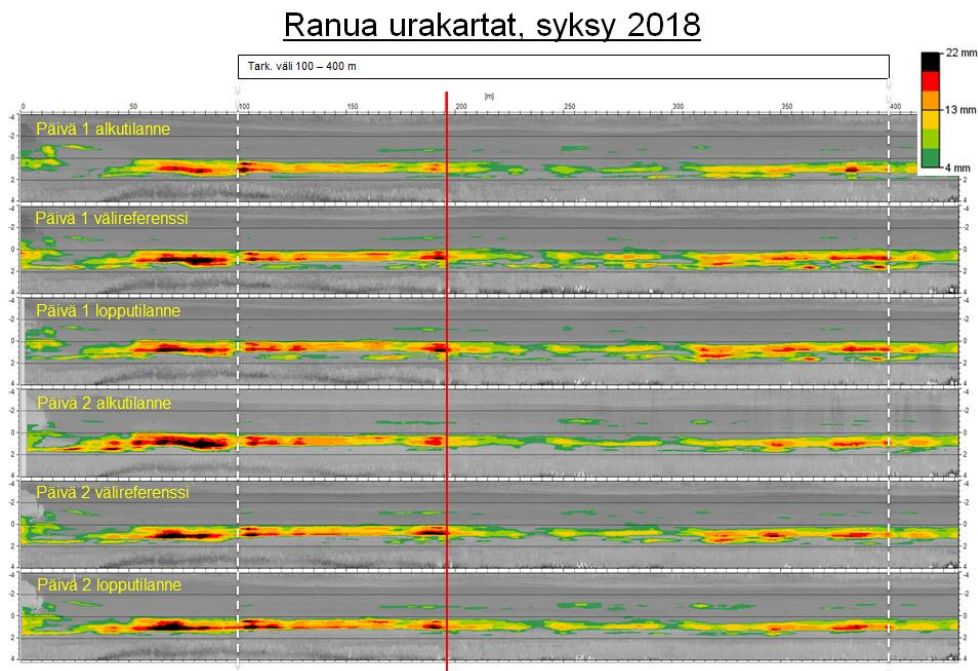
Kuvasta nähdään, että ensimmäisen päivän alkutilanteessa tierakenteen yläosa näyttää varsin kuivalta. Ensimmäisen mittauspäivän edetessä havaitaan kosteuden kasvua rakenteen yläosassa alkutilanteeseen verrattuna. Alueella oli kevyt sadekuuro kolmannen ja neljännen kuormituksen välissä. Erityisen selvästi tämä havaitaan päivän puolivälissä paaluvälillä 250–350 m. Päivän päätteeksi kosteusprofiili osoittaa jo hieman kuivumista mittauspäivän puolivälin tilanteeseen verrattuna. Toisena mittauspäivänä kosteus pysyy varsin tasaisena koko päivän ajan, eivätkä kosteusolosuhteet tierakenteessa ole muuttuneet kuormitusten aikana. Pumppautumiseen viittaavaa kosteuden nousua rakenteessa ei siis havaita.



Kuva 92. Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Ranuan kohteelta (Mt 18824) syksyiltä 2018. Pystymittakaava on nanosekunti (ns), jossa yksi nanosekunti vastaa noin 6 cm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Percoaseman kohta on merkitty punaisella pystyviivalla.

#### 4.4.5 Urautuminen laserkeilauksella

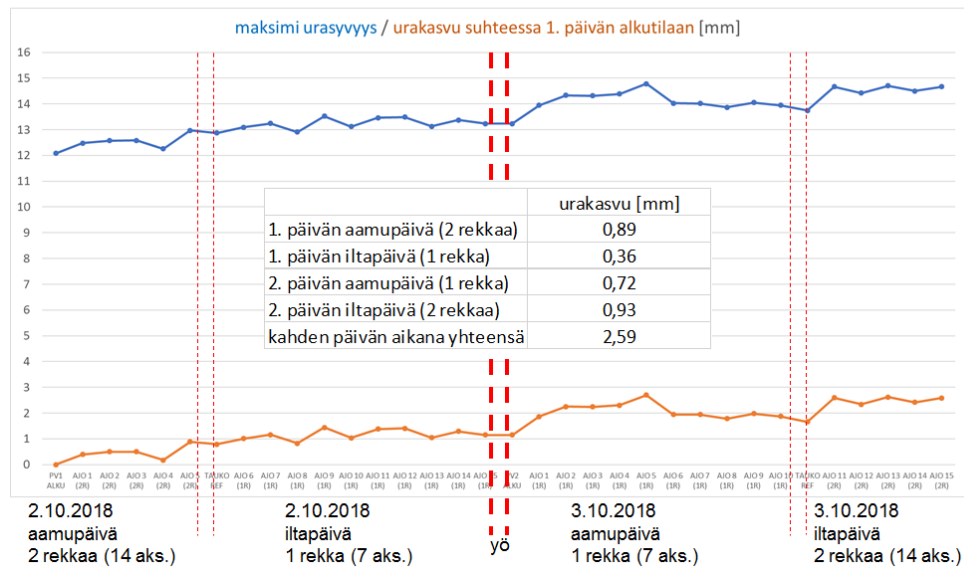
Kuvassa 93 on esitetty RDSV-urasyvyyskarttoja Ranuan (Mt 18824) mittausjaksolta syksyiltä 2018. Ylimmässä urakartassa on tilanne ennen kuormitusajoja eli ensimmäisen mittauspäivän alkutilanne. Seuraavassa urakartassa on tilanne ensimmäisen päivän puolivälissä, kun aamupäivä ajot kahdella rekalla on ajettu, ennen iltapäivän ajoja yhdellä rekalla. Kolmannessa urakartassa on tilanne ensimmäisen mittauspäivän päätteeksi. Seuraavissa kolmessa urakartassa on esitetty vastaavat tilanteet toisen mittauspäivän osalta. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Percoaseman ja mittausanturien sijainti on merkitty punaisella pystyviivalla.



Kuva 93. RDSV-urasyvyyskarttoja Ranuan kohteelta (Mt 18824) syksyllä 2018.

Tuloksia tarkasteltiin erityisesti 300 metrin matkalla paaluvälillä 100–400. Käytännössä urasyvyysien eroja on varsin vaikea erottaa visuaalisesti suoraan kartasta, jossa yksi väri vastaa kolmea millimetriä. Kuvassa 94 onkin esitetty mitatun maksimiurasyvyyden keskiarvo paaluvälillä 100–400 sekä maksimiurasyvyyden kasvu suhteessa ensimmäisen päivän alkutilanteeseen jokaiselta mittausajolta. Kuvassa olevassa taulukossa on lisäksi esitetty aina puolen päivän aikana tapahtunut urakasvu. Paaluväliltä 100–400 m laskettu urakasvun keskiarvo on ollut kahdella rekalla (5 x 14 akselia) ajettaessa ensimmäisen päivän aamupäivällä 0,9 mm ja toisen päivän iltapäivällä 0,9 mm. Yhdellä rekalla (10 x 7 akselia) ajettaessa urakasvun keskiarvo on ollut ensimmäisen päivän iltapäivällä 0,4 mm ja toisen päivän aamupäivällä 0,7 mm. Tulosten valossa siis molempien mittauspäivien aikana 14-akselinen yhdistelmä on aiheuttanut suuremman urakasvun kuin 7-akselinen yhdistelmä, kun yhdistelmissä on kulkenut mittaus-alueen yli sama massa samassa ajassa.

### Ranua urasyvytydet ja urakasvut plv 100-400, syksy 2018

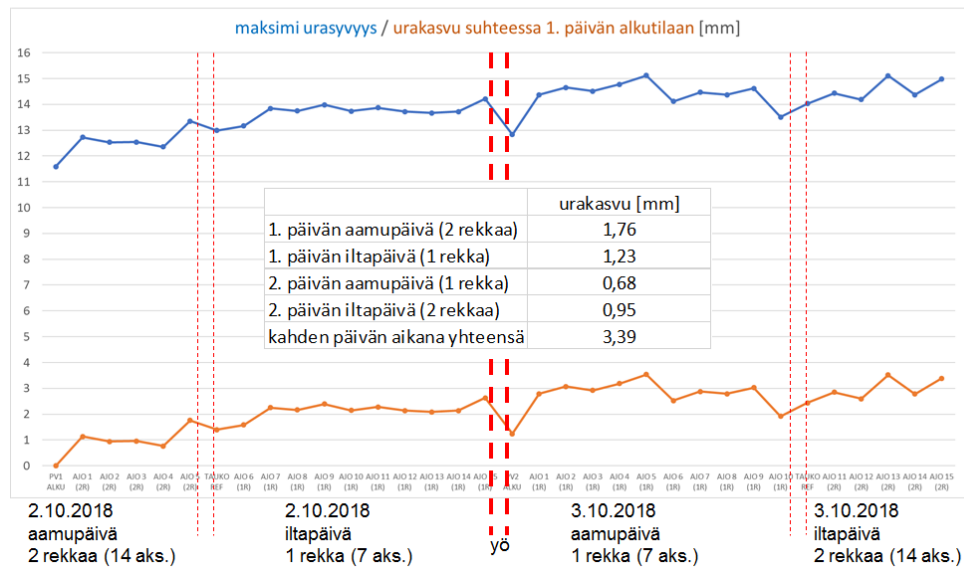


Kuva 94. Ranuan kohteelta (Mt 18824) syksyllä 2018 mitatun maksimi-urasyvyyden keskiarvo paaluvälillä 100-400 sekä maksimi-urasyvyyden kasvu suhteessa ensimmäisen päivän alkutilanteeseen jokaiselta mittausajolta.

Urasyvyyden muutoksia tarkasteltiin myös lyhyemmällä matkalla Percoaseman ympäristössä. Kuvassa 95 on esitetty vastaavat kuvaajat ja taulukko kuin edellisessä kuvassa, mutta nyt laskenta on tehty 14 metrin matkalta anturien ympäristössä (ajolinjan sivusiirtymää mittaavien lasereiden väliseltä matkalta). Tuloksista havaitaan, että kyseisellä matkalla ensimmäisenä mittauspäivänä on tapahtunut enemmän urautumista kuin pidemmältä matkalta laskettuna. Toisen mittauspäivän lukemat ovat hyvin lähellä pidemmältä matkalta laskettuja arvoja. Kuitenkin lasketut urakasvun keskiarvot osoittavat samaa kuin 300 metrin matkalta laskettuna, siis molempien mittauspäivien aikana 14-akselinen yhdistelmä on aiheuttanut suuremman urakasvun kuin 7-akselinen yhdistelmä, kun yhdistelmissä on kulkenut mittausalueen yli sama massa samassa ajassa.



### Ranua urasyvyydet ja urakasvut plv 195-209, syksy 2018



Kuva 95. Ranuan kohteelta (Mt 18824) syksyllä 2018 mitatun maksimi-urasyvyyden keskiarvo paaluvälillä 195-209 sekä maksimi-urasyvyyden kasvu suhteessa ensimmäisen päivän alkutilanteeseen jokaiselta mittausajolta.

#### 4.4.6 Yhteenveto Ranuan kohteen kuormituskokeista

- Lokakuussa 2018 kuormitettiin turpeen sekaista silttimoreenia olevalla pohjamaalla sijainnutta 0,1 m kulutuskerroksella oleva alle 0,5 m paksuista soratierakennetta. Kahtena päivänä kaksi peräkkäin 40 minuutin välein ajavaa 7-akselista rekkaa aiheutti suuremmat urasyvyyden kasvut kuin 7-akselinen rekka ajaessaan 20 minuutin välein koekohteen yli, kun tarkasteluväleinä olivat plv 100-400 ja plv 195-209. Kumpanakin kuormituspäivänä koekohteen ylitse ajettiin sekä 14- että 7-akselisella kuormitusajoneuvoyhdistelmällä.
- Kaksi peräkkäin kulkenutta 7-akselista rekkaa eivät onnistuneet ajamaan kovin hyvin samaa ajolinjaa. Kun peräkkäisten rekkojen ajolinjat eivät ole samoja, pitäisi niiden vaikutus urasyvyyden kasvuun olla pienempi kuin samaa ajouraa ajavien rekkojen.
- Ajosuunta vaikutti selkeästi toteutuneeseen ajolinjaan.
- Syksyllä 2018 paaluvälillä 250-350 m havaittiin kosteuden pientä lisääntymistä ainoastaan ensimmäisen kuormituspäivän aamupäivällä kahden peräkkäin kulkeneen 7-akselisen rekan kuormitusten loputtua, jolloin tien pintaa oli kostuttanut kevyt ja lyhytaikainen sadekuuro.



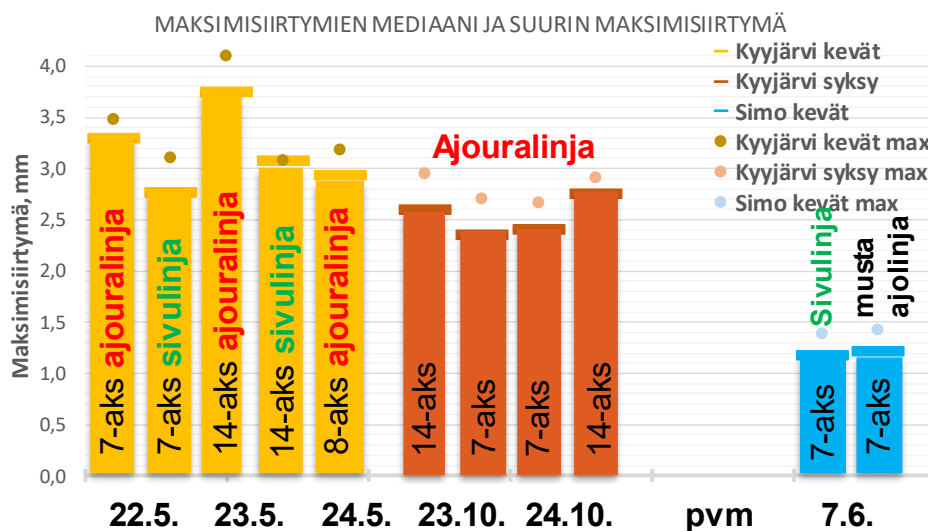
## 5 Päätelmiä ja pohdintoja kuormituskokeiden tuloksista

### 5.1 Pysyvät siirtymät ja urasyvyyksien muutokset

#### 5.1.1 Koekohteilla mitatut siirtymät

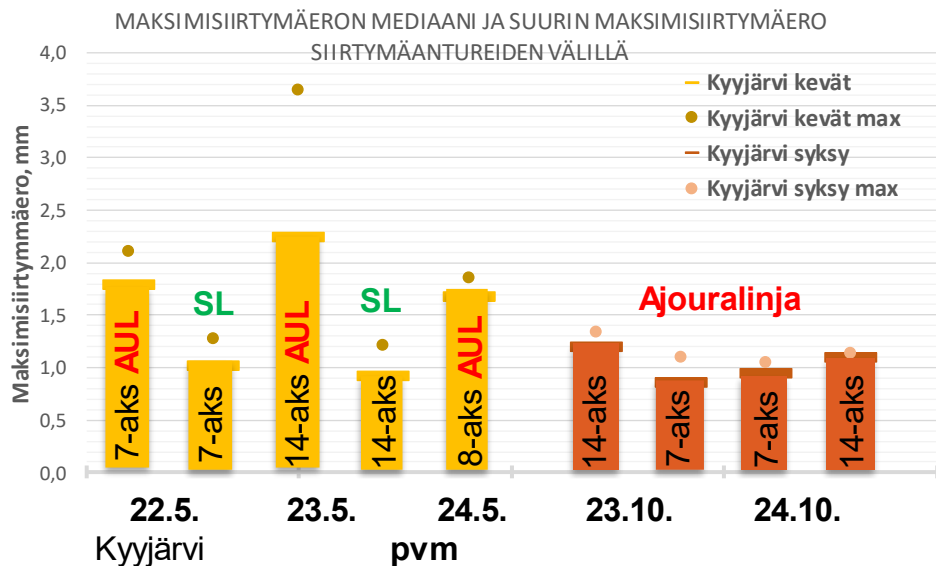
##### 5.1.1.1 Maksimisiirtymät

Kuvassa 96 on esitetty mitatut maksimisiirtymät ja ylitysten maksimisiirtymien mediaanit Kyyjärven ja Simon koekohteilta kuormitusajoneuvojen ja ajolinjojen perusteella jaoteltuna niiltä ylityksiltä, jotka ovat kulkeneet pystysiirtymäanturin päältä. Kuvasta nähdään, että keväällä Kyyjärvellä mitatut maksimisiirtymien mediaanit olivat ajouralinjalla 3,0–3,7 mm. Sivulinjalla Kyyjärvellä keväällä mitatut maksimisiirtymien mediaanit olivat noin 3 mm. Keväällä 2018 Kyyjärven kohteella maksimisiirtymien mediaani erosi enintään 0,4 mm ylitysten suurimmasta maksimisiirtymästä. Syksyllä 2018 Kyyjärvellä mitatut maksimisiirtymät ja niiden mediaanit olivat pienempiä kuin keväällä 2018. Kaksi vuotta aiemmin syksyllä 2016 9-akselisen rekan ajouralinjalla aiheuttaman maksimisiirtymän mediaani oli ollut 2,9 mm ja maksimisiirtymä 3,7 mm eli molemmat olivat suurempia kuin syksyllä 2018 (Vuorimies et al. 2018). Simon sivulinjan pystysiirtymäanturin läheltä ajettujen ylitysten (vihreä sivulinja ja musta linja ajoura- ja sivulinjan välissä) aiheuttamat maksimisiirtymien mediaanit olivat noin 1,2 mm eli puolet pienempiä kuin Kyyjärven koekohteella.



Kuva 96. Kyyjärven ja Simon koekohteilta mitatut maksimisiirtymät ja ylitysten maksimisiirtymien mediaanit kuormitusajoneuvojen ja ajolinjojen perusteella jaoteltuna niiltä ylityksiltä, jotka ovat kulkeneet pystysiirtymäanturin päältä.

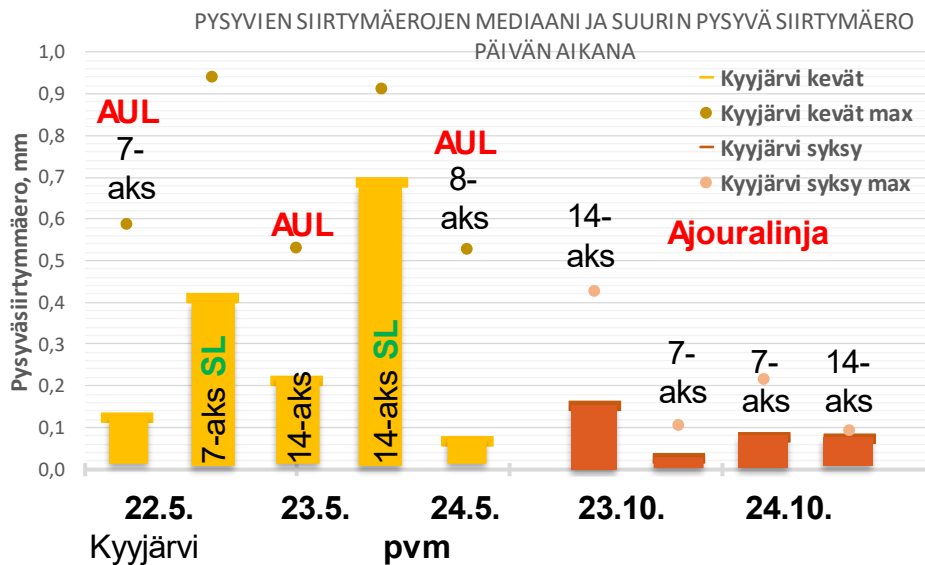
Kuvassa 97 on esitetty päivittäin eri kuormitusajoneuvojen ylityksistä mitatut ajoura- ja sivulinjan maksimisiirtymien erot ja maksimisiirtymien erojen mediaanit, kun on ajettu ajoura- tai sivulinjaa Kyyjärven koekohteella. Kuvasta nähdään, että 0,5 m etäisyydellä toisistaan olleiden antureiden välillä tien pinnan maksimisiirtymien ero ajouralinjaa ajettaessa oli keväällä kaksinkertainen syksyyn verrattuna. Ajettaessa sivulinjaa pitkin keväällä 2018 maksimisiirtymien ero oli noin puolet pienempi kuin ajouralinjaa pitkin ajettaessa.



Kuva 97. Kyyjärven koekohteelta mitatut ajoura- ja sivulinjan maksimisiirtymien suurimmat erot ja maksimisiirtymien erojen mediaanit kuormitusajoneuvojen ja ajolinjojen perusteella jaoteltuna niiltä ylityksiltä, jotka ovat kulkeneet pystysiirtymäanturin päältä.

### 5.1.1.2 Pysyvät siirtymät

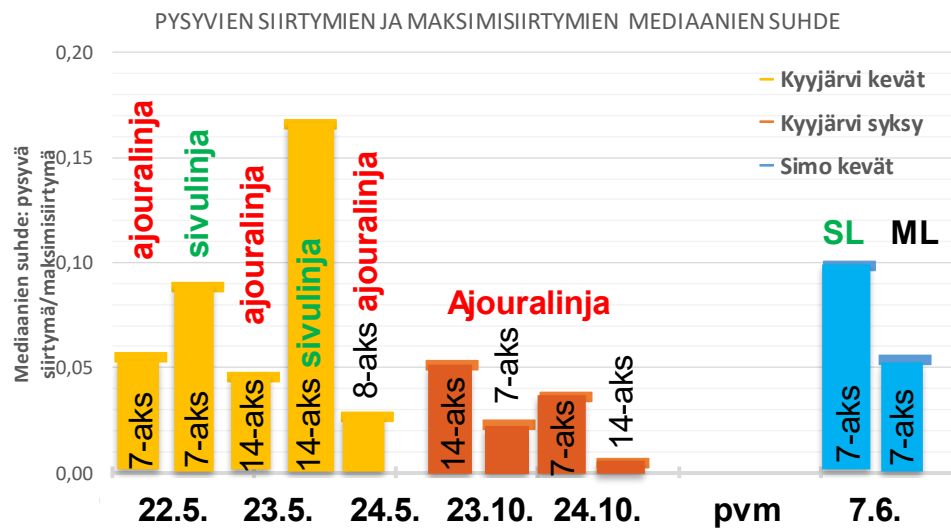
Kuvassa 98 on esitetty kahden tien pinnan tasoa mittaavan pystysiirtymäanturin pysyvien siirtymien erojen mediaanit ja maksimit kuormitusajoneuvojen ylitysten jälkeen Kyyjärven koekohteella 2018 kuormitusajoneuvojen ja ajolinjojen perusteella jaoteltuna niiltä ylityksiltä, jotka ovat kulkeneet pystysiirtymäanturin päältä. Näillä verrataan koekohteen tien pinnan painumaeron muutosta siirtymäantureiden välillä eli paikallisesti tien urasyvyyden muutosta kevään ja syksyn mittaustulosten välillä sekä sitä, poikkeako yhden kuormitusajoneuvoyhdistelmän aiheuttama suurin pysyvä siirtymäero mediaanisesta pysyvästä siirtymäerosta eli aiheuttivatko ylitykset saman suuruisia pysyviä siirtymäeroja eri ylityksillä. Lisäksi pylväiden avulla voidaan verrata eroja eri kuormitusajoneuvojen aiheuttamien pysyvien siirtymien välillä. Kahden pystysiirtymäanturin välillä mitattujen pysyvien siirtymäerojen mediaanit olivat 7-akselisilla kuormitusajoneuvoilla pienemmät kuin 14-akseliaalisilla kuormitusajoneuvoilla sekä keväällä että syksyllä. Kuvan mediaaneja tarkasteltaessa on muistettava, että 23.5.2018 14-akselisella kuormitusajoneuvolla oli vain kaksi ylitystä sivulinjaa pitkin. Keväällä 2018 ja 23.10.2018 14-akselisella kuormitusajoneuvoyhdistelmällä maksimisiirtymäerot erosivat huomattavasti siirtymäerojen mediaaneista.



Kuva 98. Kahden pystysiirtymäanturin väliset pysyvien siirtymien erotusten mediaanit ja suurin pysyvien siirtymien erotus kuormitusajoneuvojen ja ajolinjojen perusteella jaoteltuna Kyyjärven koekohteella vuonna 2018. AUL tarkoittaa kuormitusajoneuvon ajaneen ajoura- ja SL sivulinjaa.

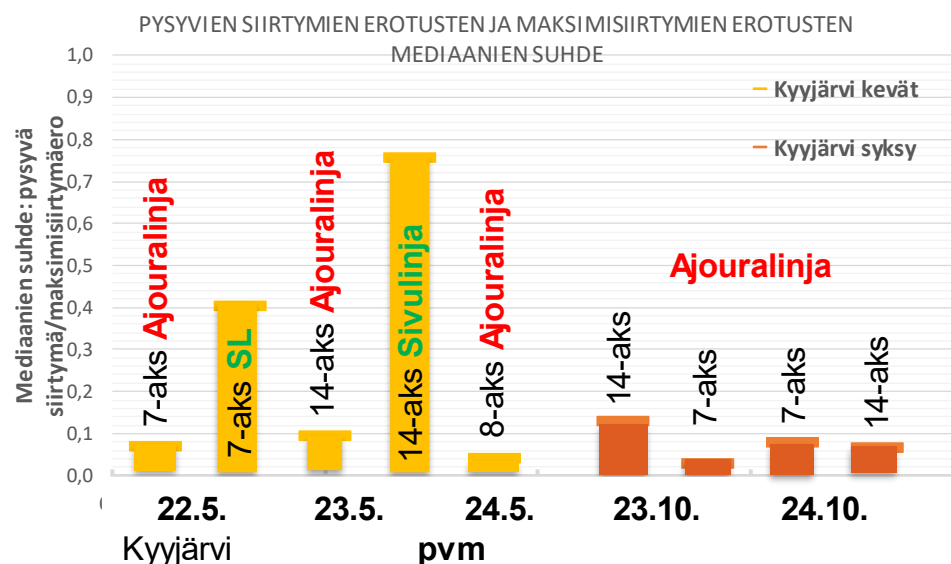
#### 5.1.1.3 Pysyvien siirtymien ja maksimisiirtymien suhde

Kuvassa 99 on esitetty pysyvien siirtymien ja maksimisiirtymien mediaanien suhde, kun ylitys on kulkenut pystysiirtymäanturin päältä Kyyjärven ja Simon kohteelta. Kuvaa tarkasteltaessa on muistettava, että 23.5.2018 14-akselinen kuormitusajoneuvoyhdistelmä ajoi vain kaksi kertaa sivulinjaa pitkin. Simon kohteen korkea suhdeluku selittyy sillä, että 7.6.2018 ajettiin neljää eri ajolinjaa pitkin ja samaa ajolinjaa ajettiin enintään kaksi kertaa peräkkäin, jolloin uudella ajolinjalla suurin osa pysyvästä siirtymästä muodostuu todennäköisesti löyhtyneen kohdan tiivistymisestä. Kyyjärven koekohteella suhdeluku oli syksyllä 2018 paljon pienempi kuin keväällä eli maksimisiirtymään nähden syksyllä syntyi vähemmän pysyviä siirtymiä. Kuvasta nähdään, että maksimisiirtymien ja pysyvien siirtymien mediaanien välillä ei ollut vakiosuhdetta.



Kuva 99. Kyjyjärven ja Simon koekohteiden pysyvien siirtymien ja maksimisiirtymien mediaanien suhde, kun ylitys on kulkenut pystysiirtymäanturin päältä. Simossa sivu- ja musta ajolinja (SL ja ML) olivat lähes yhtä etäällä pystysiirtymäanturista.

Kuvassa 100 on esitetty pystysiirtymäanturien välisten pysyvien siirtymien erotusten mediaanien ja suurimpien siirtymäerojen mediaanien suhteet Kyjyjärven koekohteelta. Nämä suhdeluvut ovat suurempia kuin kuvassa 99 esitetyt suhdeluvut. Erityisen paljon suurempia suhdeluvut olivat, kun ajettiin iltapäivällä sivulinjaa pitkin aamupäivän ajouralinjaa ajettujen kuormitusten jälkeen. Myöskään maksimisiirtymien ja pysyvien siirtymien erotusten mediaanien välillä ei ollut vakiosuhdetta.



Kuva 100. Pysyvien siirtymien erotusten mediaanien ja maksimisiirtymien erotusten mediaanien suhde Kyjyjärven koekohteella 2018.

### 5.1.2 Pysyvä siirtymä ja urasyvyyden kasvu koekohdetta kuormittaneeseen massaan nähden

Taulukossa 2 on esitetty vertailukelpoisista koekuormituksista laserkeilaimella mitatut urasyvyyksien kasvut ja pystysiirtymäantureilla mitattujen pysyvien siirtymien väliset erotukset 7-akselisten ja 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien massaa kohden. Koekohteissa sama massa kulki samassa ajassa koekohteen ylitse. Taulukosta on punaisella merkitty eniten urakasvua tai pystysiirtymäeroa aiheuttaneet kuormitussarjat ja ne olivat kahden peräkkäin kulkeneen 7-akselisen rekan muodostaman kuormitusajoneuvoyhdistelmän aiheuttamia. Vihreällä merkittyjen eli vähiten pystysiirtymäeron ja urasyvyyden kasvua tai eniten urasyvyyden pienentymistä aiheuttaneet kuormitussarjat olivat 7-akselisia kuormitusajoneuvoyhdistelmiä yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Simon koekohteessa urakasvun muutokset olivat erittäin pieniä urasyvyyden pysyessä käytännössä muuttumattomana. Laskettaessa kuormitusajoneuvoyhdistelmittäin keskiarvot koekohteiden urasyvyyksien kasvulle nähdään tuloksista, että 14-akseliset kuormitusajoneuvoyhdistelmät aiheuttivat selkeästi suuremman urasyvyyden kasvun kulkenutta massaa kohden kuin 7-akseliset kuormitusajoneuvoyhdistelmät, kun sama massa kulki koekohteen yli samassa ajassa Kyyjärven turvopohjamaalla sijainneella 30–40 mm päällysteellä olevalla noin 0,6 m paksuisella tierakenteella ja Ranuan soratiellä. Simon silttiä tai silttistä hiekkaa olevalla pohjamaalla sijainneella noin 110 mm päällysteellä olevalla noin 0,6 m paksuisella tierakenteella ei havaittu eroa urasyvyyden kasvun perusteella.

Kuormitusajoneuvojen ajolinjojen mittauksissa havaittiin, että 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat jakautuivat hieman laajemmalle alueelle kuin 7-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat. Tämä on todennäköisesti pienentänyt 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien aiheuttamaa urasyvyyden kasvua verrattuna tilanteeseen, jossa 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat olisivat kulkeneet 7-akselisten ajoneuvoyhdistelmien ajolinjoja vastaavalla alueella. Siksi määritetyt erot 14- ja 7-akselisten ajoneuvoyhdistelmien välillä olisivat todellisuudessa jonkin verran suurempia, jos kuormitusajoneuvoyhdistelmät ajaisivat täsmälleen samoja ajolinjoja pitkin.

**Taulukko 2.** *Ranuan, Kyyjärven ja Simon koekohteista 2018 laserkeilaimella mitatut urasyvyyksien kasvut ja pystysiirtymäantureiden pysyvien siirtymien väliset erotukset 7- ja 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien massaa kohden.*

Kuormitus	Urakasvu tai pysyvä siirtymäero, µm/tn					
	Kaikki ylitykset			Ensimmäiset ylitykset pois		
	Pitkä väli	lyhyt väli	siirtymäero*	Pitkä väli	lyhyt väli	siirtymäero*
Ranua 2.10. ap 14-aks	1,4	<b>2,8</b>	--	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	--
Ranua 2.10. ip 7-aks	<b>0,6</b>	2,0	--	0,0	0,7	--
Ranua 3.10. ap 7-aks	1,2	<b>1,1</b>	--	<b>-0,8</b>	<b>-2,3</b>	--
Ranua 3.10. ip 14-aks	<b>1,5</b>	1,5	--	0,0	1,1	--
Kyyjärvi 23.10. ap 14-aks	0,6	1,6	<b>1,2</b>	<b>-0,9</b>	0,3	<b>0,6</b>
Kyyjärvi 23.10. ip 7-aks	0,1	<b>-1,1</b>	<b>0,1</b>	-0,1	<b>-1,5</b>	<b>0,0</b>
Kyyjärvi 24.10. ap 7-aks	<b>-0,1</b>	-0,5	0,9	<b>-0,9</b>	0,2	0,4
Kyyjärvi 24.10. ip 14-aks	<b>0,6</b>	<b>1,7</b>	0,4	<b>1,2</b>	<b>1,9</b>	0,4
Simo 5.6. 7-aks	0,1	--	--	--	--	--
Simo 6.6. 14-aks	0,0	--	--	--	--	--
<b>Keskiarvo Ranua 14-aks</b>	<b>1,5</b>	<b>2,2</b>	--	<b>0,5</b>	<b>1,2</b>	--
<b>Keskiarvo Ranua 7-aks</b>	<b>0,9</b>	<b>1,5</b>	--	<b>-0,4</b>	<b>-0,8</b>	--
<b>Keskiarvo Kyyjärvi 14-aks</b>	<b>0,6</b>	<b>1,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,1</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>
<b>Keskiarvo Kyyjärvi 7-aks</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,7</b>	<b>0,2</b>

Kohteen suurin mittausarvo

Kohteen pienin mittausarvo

\* Pystysiirtymäanturien välinen siirtymäero eli tien pinnan painumaero 0,5 m matkalla

### 5.1.3 Pysyvän siirtymän ja urasyvyyden muutoksen tarkastelu viimeisten ylitysten ollessa lähtökohta

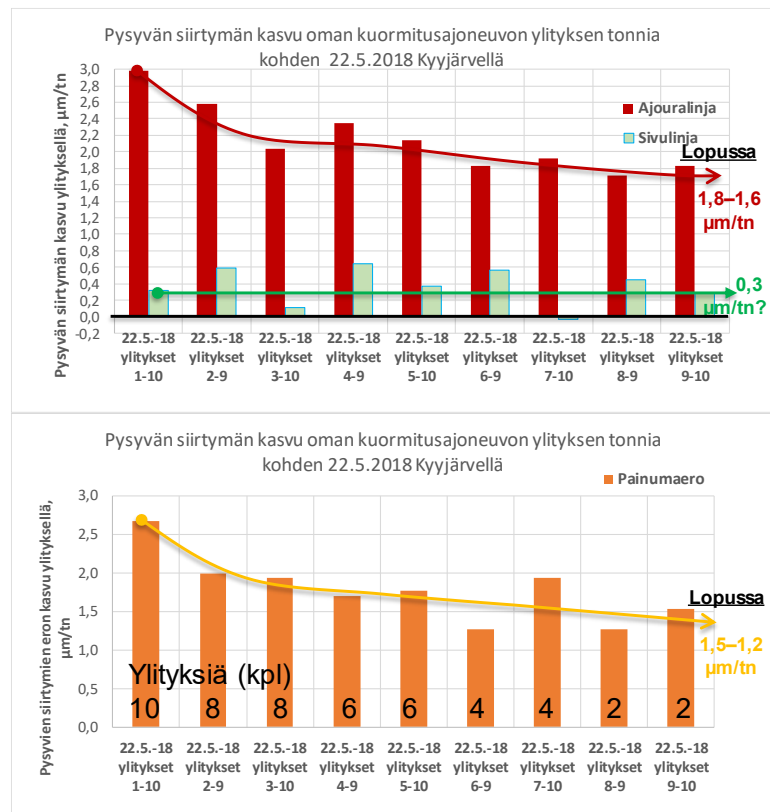
#### 5.1.3.1 Pysyvä siirtymä

Keväällä 2018 Kyyjärven koekohteella koko tierakenne tiivistyi kuormituspäivien aikana. Suurimmat pysyvät siirtymät muodostuivat ensimmäisillä ylityksillä. Lisäksi ajosuunta vaikutti kuormitusajoneuvojen ajolinjoihin, mikä vaikutti pystysiirtymäantureista mitattuihin pysyviin siirtymiin. Lisäämällä ajosuunnittain viimeisen ylityksen pysyvä siirtymä ja sitä aiemmista ylityksistä muodostuneet pysyvät siirtymät mittauskohteen ylitse kulkenutta massaa kohden, olisi mahdollista havainnoida selkeämmin vakiintuuko keskimääräinen pysyvä siirtymä mittauskohteen ylitse kulkevaa massaa kohden, kun kuormitusajoja on ajettua useampia kertoja. Täten tarkastelu on tehty ikään kuin käänteisessä järjestyksessä tyypilliseen tarkastelu tapaan nähden, jossa pysyvien siirtymien laskemien aloitetaan kuormitusajoneuvon ensimmäisestä ylityksestä

Kuvissa 101–103 on esitetty Kyyjärven koekohteella ajouralinjaa pitkin ajettujen ylitysten aiheuttamat tien pinnan pysyvät siirtymät ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden kohdalla. Kuvissa 7-akselisen kuormitusajoneuvon aiheuttamat pysyvät siirtymät on laskettu kumpaankin ajosuuntaan tehdystä viimeisestä ylityksestä lisäten siihen aiempien ylitysten pysyvät siirtymät. Täten kahdessa viimeisessä pylväässä on kahden viimeisen ylityksen aiheuttamat pysyvät siirtymät ja sitä edellisiin on lisätty aina enemmän edellisiä ylityksiä. Koska 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän ylityksiä oli vähän, kahdessa viimeisessä pylväässä on ajosuuntaansa viimeisen ylityksen aiheuttama pysyvä siirtymä ja sitä edellisissä useamman ylityksen aiheuttamat pysyvät

siirtymät. Kuvissa ylempänä on ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureista mitatut pysyvät siirtymät ja alempana niiden erotus.

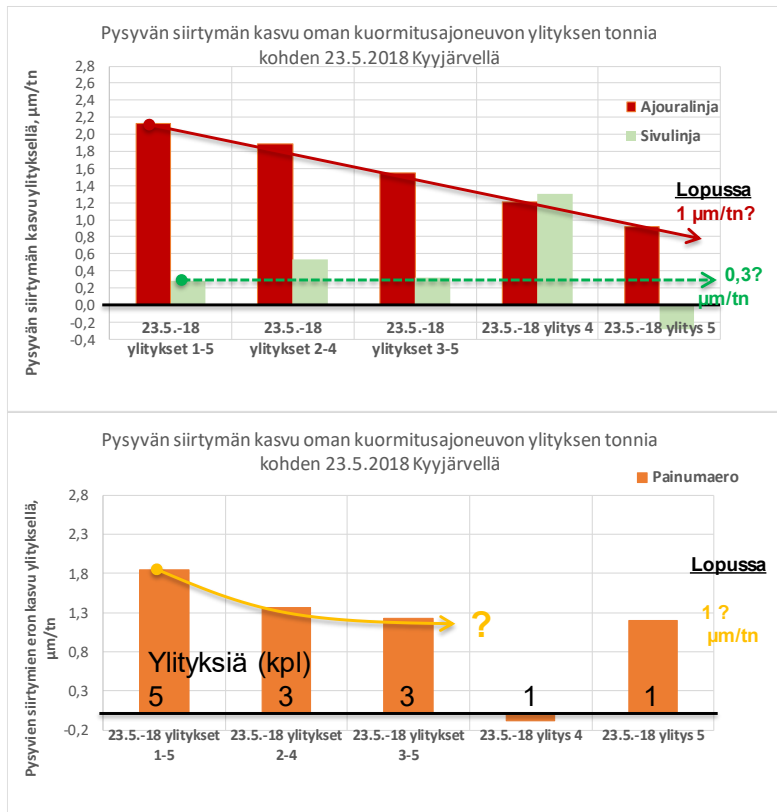
Kuvassa 101 on esitetty Kyyjärven koekohteella aamupäivällä 22.5.2018 7-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän ajouralinjaa pitkin ajamien ylitysten aiheuttamat tien pinnan pysyvät siirtymät. Kuvan perusteella ajouralinjalta mitattu pysyvä siirtymä ylitystä kohden pienenee viimeisillä ylityksillä, mutta sivulinjalla pysyvä siirtymä ylitysten massaa kohden vaihtelee suuresti ilman selkeätä trendiä. Tällöin tien pinnan painumaero näiden 0,5 m etäisyydellä toisistaan sijaitsevien pystysiirtymäantureiden välillä pienenee edelleen viimeisillä ylityksillä. Voisi sanoa, että tierakenne tiivistyy edelleen 22.5.2018 ajettaessa ajouralinjan viimeisiä ylityksiä.



Kuva 101. Ajosuunnan viimeisestä ylityksestä ajosuunnittain lasketut Kyyjärven koekohteen tien pinnan pysyvät siirtymät sekä painumaero ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden kohdalta 22.5.2018. Kuormitusajoneuvo oli 7-akselinen tukkirekka.

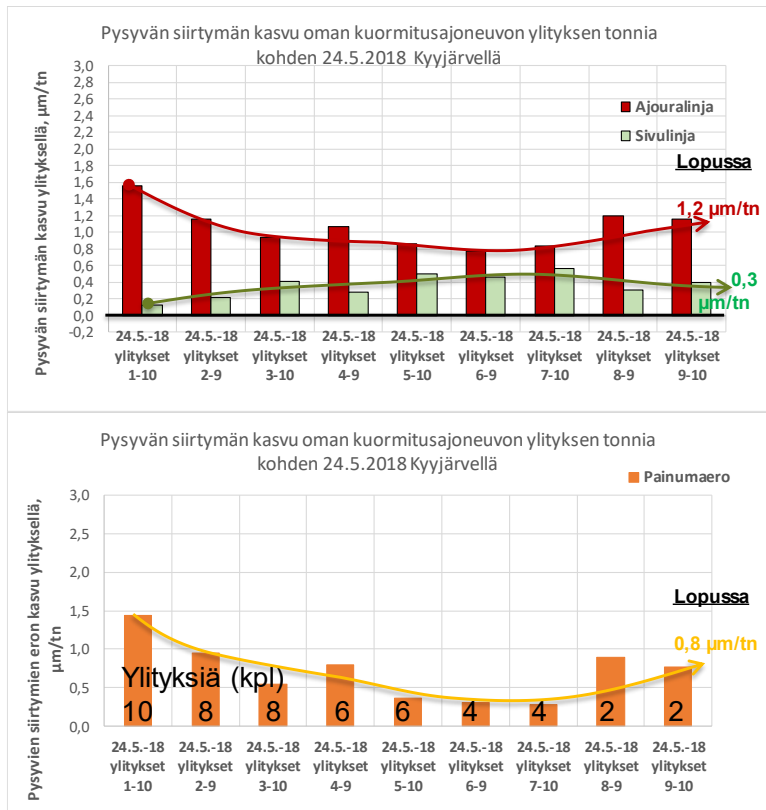
Kuvassa 102 on esitetty aamupäivällä 23.5.2018 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän ajouralinjaa pitkin ajamien ylitysten aiheuttamat tien pinnan pysyvät siirtymät Kyyjärven koekohteella. Kuvan perusteella ajouralinjalta mitattu pysyvä siirtymä ylitystä kohden pienenee viimeisillä ylityksillä, mutta sivulinjalla pysyvä siirtymä ylitysten massaa kohden vaihtelee suuresti ilman selkeätä trendiä. Tällöin tien pinnan painumaero näiden 0,5 m etäisyydellä toisistaan sijaitsevien pystysiirtymäantureiden välillä näyttäisi tasaantuvan viimeisillä ylityksillä, mutta neljännen ylityksen aiheuttama suuri pysyvä siirtymä sivulinjalla estää luotettavan arvion tekemisen.





Kuva 102. Ajosuunnan viimeisestä ylityksestä ajosuunnittain lasketut Kyyjärven koekohteen tien pinnan pysyvät siirtymät sekä painumaero ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden kohdalta 23.5.2018. Kuormitusajoneuvoyhdistelmässä oli 14 akselia.

Kuvassa 103 on esitetty 24.5.2018 aamupäivän ajouralinjaa pitkin ajettujen ylitysten aiheuttamat tien pinnan pysyvät siirtymät Kyyjärven koekohteella. Kuormitusajoneuvoyhdistelmän (8+2-akselia) peräkärryn viimeinen teli oli erikoisrakenteinen. Kuvan perusteella ajouralinjalta mitattu pysyvä siirtymä ylitystä kohden näyttäisi pienenevän aluksi, mutta viimeisillä ylityksillä ehkä kasvaisi. Ylityksillä sivulinjan pysyvä siirtymä näyttäisi aluksi kasvavan ja pienenevän lopussa, mutta muutokset trendissä ovat pieniä. Täten tien pinnan painumaero näiden 0,5 m etäisyydellä toisistaan sijaitsevien pystysiirtymäantureiden välillä näyttäisi pienenevän aluksi, mutta kasvavan viimeisillä ylityksillä. Jos kuormitusajoneuvon ylityksiä olisi jatkettu samoilla kuormitusasetuksilla, olisi ollut mielenkiintoista nähdä, olisivatko pysyvät siirtymät jatkaneet kasvua.



Kuva 103. Ajosuunnan viimeisestä ylityksestä ajosuunnittain lasketut Kyyjärven koekohteen tien pinnan pysyvät siirtymät sekä painumaero ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden kohdalta 24.5.2018. Kuormitusajoneuvoyhdistelmän peräkärryn viimeinen teli oli erikoisrakenteinen.

Kuvissa 101-103 esitetyissä Kyyjärjen kohteen kevään 2018 tarkasteluissa pysyvien siirtymien käyttäytymien oli jokaisen kolmena päivänä erilainen. Tämän tarkastelun perusteella ei saada selkeitä perusteluja kolmen erilaisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän välille. Tarkastelun kannalta olisi ollut hyvä, jos ns. 14-akselisella kuormitusajoneuvoyhdistelmällä olisi ajettu yksi ylitys enemmän, jolloin kumpaankin ajosuuntaan olisi ajettu sama määrä ylityksiä. Muiden kuormitusajoneuvojen ylitysmääriä olisi vastaavasti lisätty.

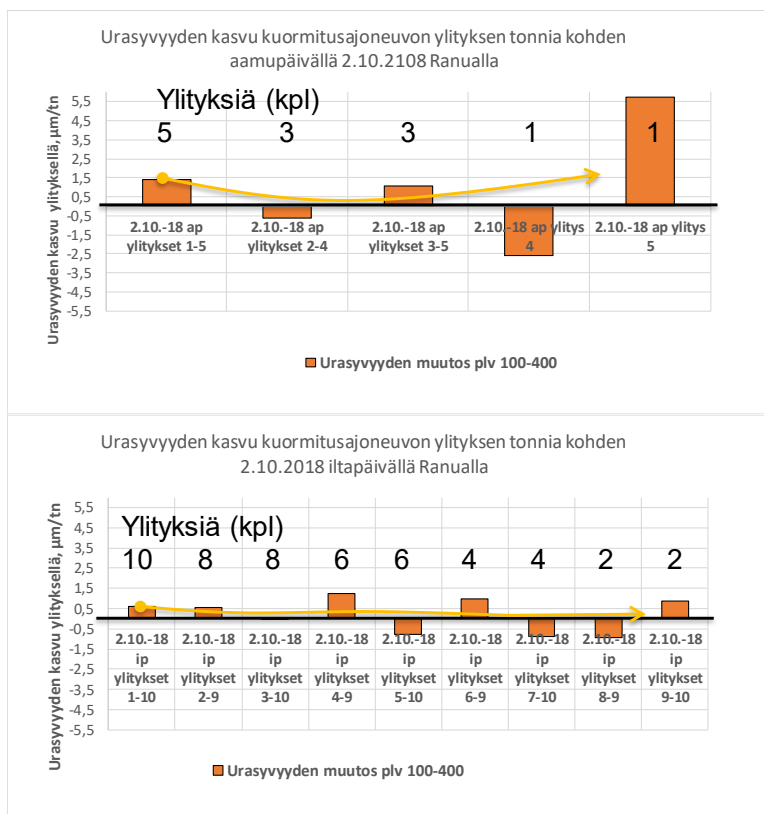
Kyyjärven kohteen pysyviä siirtymiä tarkasteltiin myös syksyn 2018 osalta vastaavalla tavalla kuin keväällä 2018. Koska tarkastelulla ei selville selkeitä johtopäätöksiä 7-akselisen ja ns. 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmien välillä niitä ei esitetä tässä raportissa.

### 5.1.3.2 Urasyvyyden muutos

Myös urasyvyyden muutosta tarkasteltiin syksyn kuormitusten osalta laske-malla ajosuunnittain viimeisen ylityksen urasyvyyden kasvu ja sitä aiemmista ylityksistä muodostuneet urasyvyyksien kasvut mittauskohteen ylitse kulke-nutta massaa kohden. Tarkoituksena oli tutkia, onko mahdollista havainnoida selkeämmin, vakiintuuko keskimääräinen urasyvyyden kasvu mittauskohteen ylitse kulkevaa massaa kohden, kun kuormitusajoneuvoja on ajettua useampia kertoja. Kuvissa 104–105 on esitetty esimerkkinä Ranualla syksyllä 2018 soratiellä ajouralinjaa pitkin ajettujen ylitysten aiheuttamat urasyvyyden kasvu kuor-mitusajoneuvoyhdistelmien koekohteen ylittynyttä massaa kohden. Kyyjärven

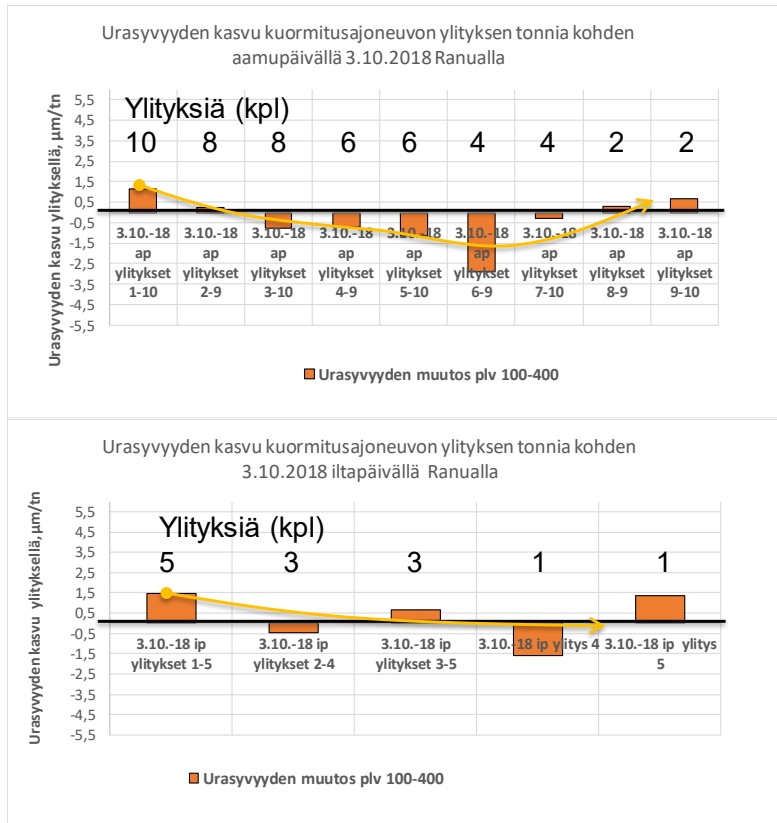
koekohteen syksyn 2018 kuormitusten tulokset eivät olleet selkeitä ja niiden tuloksia ei esitä tässä raportissa. Kuormitusajoneuvoyhdistelmänä oli joko kaksi peräkkäin ajavaa 7-akselista rekkaa tai 7-akselinen rekka. 7-akselisen rekan kohdalla kuvan kahdessa viimeisessä pylväässä on kahden viimeisen ylityksen aiheuttamat pysyvät siirtymät. Koska 14-akselisella kuormitusajoneuvoyhdistelmällä ylityksiä oli vähän, kahdessa viimeisessä pylväässä on ajosuuntaansa viimeisen ylityksen aiheuttamat pysyvät siirtymät ja sitä edellisissä useamman ylityksen aiheuttamat pysyvät siirtymät.

Kuvassa 104 on esitetty 2.10.2018 ajouralinjaa pitkin ajettujen ylitysten aiheuttamat urasyvyyden kasvut Ranuan koekohteella. Kuvassa ylempänä on aamupäivän ja alempana iltapäivän urasyvyyden kasvut. Kuvan perusteella urasyvyys ylitystä kohden näyttäisi pienenevän ajosuuntaan 2 ajetun ylityksen jälkeen ja suurevan ajosuuntaan 1 tarkasteluvälillä plv 100–400. Viimeisellä 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän ylityksellä urasyvyyden kasvu oli suuri. Iltapäivällä muutokset urasyvyyden kasvussa olivat pieniä. Kuvan perusteella urasyvyyden muutokset olivat selkeästi suurempia aamupäivällä kuin iltapäivällä mittaushetken yllä kulkenutta massaa kohden aamupäivällä.



Kuva 104. Ajosuunnan viimeisestä ylityksestä ajosuunnittain lasketut Ranuan koekohteen soratien urasyvyyden kasvut tarkasteluväliltä plv 100–400 aamu- (ylempi) ja iltapäivällä (alempi) 2.10. Kuormitusajoneuvoyhdistelmänä oli aamupäivällä kaksi peräkkäin ajavaa 7-akselista tukkirekkaa ja iltapäivällä 7-akselinen tukkirekka.

Kuvassa 105 on esitetty 3.10.2018 ajouralinjaa pitkin ajettujen ylitysten aiheuttamat urasyvyyden kasvu Ranuan koekohteella. Kuvassa ylempänä on aamupäivän ja alempana iltapäivän urasyvyyden kasvut. Kuvan perusteella aamupäivällä urasyvyys ylitystä kohden näyttäisi hieman kasvavan viimeisillä ylityksillä urasyvyyksien pienentyttyä sitä ennen. Iltapäivällä muutokset urasyvyyden kasvussa olivat maltillisia 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän massaa kohden. Kuvan 105 perusteella ei voi tehdä pitkälle vieviä johtopäätöksiä. Tämän tarkastelun kannalta vähintään yksi 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän ylitys lisää olisi tarvittu.



Kuva 105. Ajosuunnan viimeisestä ylityksestä ajosuunnittain lasketut Ranuan koekohteen soratien urasyvyyden kasvut tarkasteluväliltä plv 100–400 aamu- (ylempi) ja iltapäivällä (alempi) 3.10. Kuormitusajoneuvoyhdistelmänä oli aamupäivällä 7-akselinen tukkirekka ja iltapäivällä kaksi peräkkäin ajavaa 7-akselista tukkirekkaa.

#### 5.1.4 Parannusehdotuksia ja huomioitavia asioita kuormitusajoneuvoyhdistelmiä vertaileviin teiden koekuormituksiin

Tässä kappaleessa pohditaan mitä asioita olisi huomioitava ja parannettava, kun samalla koekohteella verrataan erilaisia ajoneuvoyhdistelmiä keskenään. Nämä huomioitavat asiat perustuvat pääosin vuoden 2018 koekuormitusten yhteydessä esiin tulleisiin havaintoihin, mutta mukana on myös vuosien 2015–2017 koekuormitusten yhteydessä todettuja asioita.

Keväällä toteutettavissa ajoneuvoyhdistelmien vaikutuksia vertailevissa tutkimuksissa olisi tärkeää, että tierakenne ei olisi jäänyt löyhäksi roudan sulamisen jäljiltä. Jos ensimmäisen vertailtavan ajoneuvoyhdistelmän ylitykset tiivistävät

tierakennetta ja pohjamaata, seuraavan ajoneuvoyhdistelmän osalta lähtötilanne on hyvin erilainen. Tällainen tilanne saattaa muodostua, jos koekohde on vähäliikenteinen tie, jolla on vähän raskasta liikennettä. Yksi mahdollinen vaihtoehto tilanteen parantamiseksi tai vertailun lähtökohtien tasaisemmaksi saattamiseksi olisi esikuormitusten tekemien 2–7 päivää ennen varsinaisia vertailukuormituksia. Syksyllä 2018 toteutettu kaksipäiväinen ajoneuvoyhdistelmien vertailu, jossa kumpanakin päivänä ajetaan kummallakin ajoneuvoyhdistelmä, mutta niiden järjestys on päinvastainen eri päivinä, tasoittaa lähtötilanteessa olleiden olosuhde-erojen vaikutusta.

Toinen ajoneuvoyhdistelmien vertailua vaikeuttava tekijä voi olla vilkas raskas liikenne. Tällöin ainoaksi vaihtoehdoksi jää kuormitettavan kaistan sulkeminen muulta liikenteeltä mittausten ajaksi.

Koska täysin saman ajolinjan ajaminen ei todennäköisesti onnistu, olisi koekohde valittava ajolinjojen hajonnan pienentämiseksi siten, että sillä voidaan ajaa kuormitettavaa kaistaa vain yhteen suuntaan. Jos kuitenkin joudutaan ajamaan kahteen suuntaan, ylityksiä olisi tehtävä parillinen määrä, jolloin kumpaankin suuntaan tulisi yhtä monta ylitystä. Eri ajosuuntia varten voisi olla myös omat ajolinjamerkintänsä, jolloin ajolinjan tähtäys tapahtuisi kuljettajan kannalta aina samalla tavalla.

Erityisesti kaarteissa olevia koekohteita on vältettävä, koska kaarteissa toteutuneiden ajolinjojen hajonta kasvaa. Kaarteissa olevia koekohteita ei saisi käyttää varsinkaan silloin, jos kuormitettavaa kaistaa pitäisi ajaa molempiin suuntiin.

Tämän tutkimuksen mittaustulosten perusteella, kun kuljettajat pyrkivät ajamaan samaa tiehen piirrettyä ajolinjaa pitkin, eri kuljettajat ajoivat hieman eri ajolinjaa toisiinsa nähden. Tällöin olisi suositeltavaa käyttää mahdollisimman paljon samoja kuljettajia. Tätä puoltaisi myös se, että useimmiten ensimmäiset kuormitukset haluttua ajolinjaa pitkin poikkeavat eniten keskimääräisistä ajolinjoista. Jos ylimääräisten ajoketojen tekeminen on mahdollista, koekohteella tehtävät muutamat harjoituskuormitukset parantaisivat todennäköisesti ajoneuvoyhdistelmien vertailtavuutta. Nämä harjoituskuormitukset soveltuisivat erinomaisesti esikuormitusten yhteyteen, kun tierakennetta ja pohjamaata halutaan tiivistää ennen varsinaisia kuormituksia.

Ajoneuvoyhdistelmien välisten vertailujen tekemistä parantaisi myös tarkat vaatimukset ajoneuvojen renkaille ja akselikuormille kokonaiskuormien lisäksi. Tällöin myös pyöräkuormat olisi mitattava. Akselipainon jakautumien tasaisesti kummallekin puolelle akselia eli pyörille olisi erittäin tärkeää varsinkin ajoneuvoyhdistelmien ajaessa kuormitettavaa kaistaa molempiin suuntiin.

Sääolosuhteet tai niiden ennustaminen aiheuttavat oman pohdintansa. Monien mittauslaitteiden käytettävyyden vaikeutuu, jos mittauspäivinä sataa. Täten kuormitusten ajaksi olisi onnistuttava valitsemaan mahdollisimman sateeton ajanjakso. Lisäksi olisi suotavaa, että kuormituspäivinä olisi pilvipoutaa ja lämpötila eri mittauspäivinä olisi samaa suuruusluokkaa (+5 - +15 °C). Tällöin päällysteen lämpötilan vaihtelut eivätkä tierakenteen kuivumisen vaikuttaisi ajoneuvoyhdistelmien välisen vertailun tekemiseen. Pakkanen ei ole myöskään toivottavaa mittauspäivinä. Sorateilla tehtävissä mittauksissa kuivan tien pinnan pölyämien saattaa myös vaikeuttaa optisten mittausmenetelmien käyttöä.

## 6 Johtopäätökset

Väyläviraston (entinen Liikennevirasto) toimeksiannosta erityyppisillä tierakenteilla tehdyissä kuormituskokeissa testattiin perinteisten tierakenteen kestävyysmitoitusmallien lähtökohtana olevan nk. neljännen potenssin säännön (AASHO-teorian) toimivuutta moniakselisten raskaiden rekkojen aiheuttamien tierasituksen arvioinnissa. Merkittävimmät vertailevat kuormituskokeet 7-akselisten ja 14-akselisten ajoneuvoyhdistelmien välillä tehtiin syksyllä 2018. Tällöin Kyyjärven ja Ranuan koekohteita kuormitettiin ajattamalla ensimmäisenä aamupäivänä kahta 7-akselista noin 62 tonnin ajoneuvoyhdistelmää peräkkäin noin 40 minuutin välein ja iltapäivällä yli 1,5 tunnin tauon jälkeen yhtä 7-akselista noin 62 tonnin yhdistelmää noin 20 minuutin välein. Toisena päivänä ajot tehtiin päinvastaisessa järjestyksessä eli aamupäivällä ajatettiin yhtä 7-akselista yhdistelmää ja iltapäivällä tauon jälkeen kahta 7-akselista noin 62 tn yhdistelmää peräkkäin. Tällöin jokaisena ajanjaksona kuormitusajoneuvojen kuljettama kokonaismassa oli yhtä suuri.

Syksyllä 2018 14-akseliset kuormitusajoneuvoyhdistelmät aiheuttivat selkeästi suuremman urasyvyyden kasvun mittauskohteen yli kulkenutta massaa kohden kuin 7-akseliset kuormitusajoneuvoyhdistelmät, kun sama massa kulki koekohteen yli samassa ajassa. Sama tulos saatiin sekä Kyyjärven turvepohjamaalla sijainneella 30–40 mm päällysteellä olevalla noin 0,6 m paksuisella tierakenteella että Ranuan soratiellä. Koekohteilla ei havaittu syksyn 2015 mittauksen aikana muita raskaita ajoneuvoja. Kuormitusajoneuvojen ajolinjojen mittauksissa havaittiin, että 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat jakautuivat hieman laajemmalle alueelle kuin 7-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat. Tämä on todennäköisesti pienentänyt 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien ylityksistä mitattua urasyvyyden kasvua verrattuna tilanteeseen, jossa 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat olisivat kulkeneet 7-akselisten ajoneuvoyhdistelmien ajolinjoja vastaavalla alueella. Siksi määritetyt erot 14- ja 7-akselisten ajoneuvoyhdistelmien välillä olisivat todellisuudessa olleet jonkin verran suurempia, jos kuormitusajoneuvoyhdistelmät olisivat ajaneet täsmälleen samoja ajolinjoja pitkin.

Keväällä 2018 tehdyissä mittauksissa silttiä tai silttistä hiekkaa olevalla pohjamaalla sijainneella noin 110 mm päällysteellä olevalla noin 0,6 m paksuisella tierakenteella Simon koekohteella ei havaittu eroa urasyvyyden kasvun perusteella 7- ja 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien välillä, kun sama massa kulki koekohteen yli samassa ajassa. Simon koekohteen mittauskaistaa pitkin oli kulkenut tukkirekkoja päivittäin ennen kuormitusajoja, mutta mittausajankohtina koekohteen mittauskaistaa kuormittivat vain koekuormitusta varten tilatut ajoneuvoyhdistelmät.

Keväällä 2018 tehtyjen mittauksen aikana Kyyjärven koekohteen olosuhteet eivät olleet tasavertaiset eri päivinä ajatettujen eri kuormitusyhdistelmien vertailun kannalta, koska tierakenne oli harvaan liikennöidyllä tiellä roudan sulamisen jälkeen heikosti tiivistynyt ja ensimmäiset kuormitukset tiivistivät tierakennetta ja pohjamaata merkittävästi. Lisäksi erittäin lämpimät ja aurinkoiset päivät kuivattivat mittauksen aikana tierakennetta jatkuvasti parantaen osaltaan tierakenteen ominaisuuksia.

Keväällä 2018 ajolinjojen vaihtelulla kyettiin pienentämään urasyvyyttä Kyyjärven ja Simon koekohteilla. Automaattisen ohjauksen avulla osa ajoneuvoista voitaisiin ohjata pienentämään uria ainakin suorilla tieosuuksilla. Jos automaattisella ohjauksella kulkevia ajoneuvoja ei ohjata ajamaan eri ajolinjoja, vaan ne kulkevat täsmälleen samaa ajolinjaa pitkin, poistuu ajolinjojen vaihtelun urakasvua pienentävä vaikutus. Tällöin urat syvenevät nopeammin ja urien reunat tulevat jyrkemmiksi. Tähän liittyen pitäisi tutkia, kuinka lähellä tien reunaa raskaita ajoneuvoja voidaan ajattaa tierakenteen vaurioiden nopeuttamatta raskaitten ajoneuvojen tyypillisten ajolinjojen aiheuttamiin vaurioihin verrattuna.

Ajosuunta ja tien kaarevuus mittauspistettä lähestyttäessä vaikuttivat selkeästi toteutuneeseen ajolinjaan. Kahteen suuntaan ajettavia koekohteita olisi vältettävä erilaisia kuormitusyhdistelmiä vertailtaessa erityisesti, jos ne sijaitsevat kaarteissa. Jatkossa kuormitusajoneuvoyhdistelmien vertailutesteissä suositellaan ajamaan ajolinjoja pitkin ainoastaan yhteen suuntaan.

Tutkimusten perusteella tierakenteet olivat herkimmillään urautumiselle pohjamaan ollessa turvetta tai muuta erityisen pehmeää pohjamaata ja lisäksi roudan sulamisen aikana pohjamaan ollessa silttiä tai hienoa hiekkaa. Tämän tutkimuksen yhteydessä ei vastaavissa olosuhteissa tehty vertailevia kuormituskokeita 7-akselisten ja 14-akselisten yhdistelmien välillä kohteissa, joissa päällysteen paksuus olisi ollut 100–150 mm. Päällysteen paksuuden lisäksi tierakenteen kokonaispaksuus ja tien kerrosrakenteiden materiaalit vaikuttavat myös tien urautumiseen. Tehtyjen lyhyiden kuormituskokeiden ja aiempien kokeusten perusteella voidaan arvioida, että

- A. Ohutpäällysteisillä teillä, joiden päällysteen paksuus on alle 150 mm, nk. neljännnen potenssin sääntö (AASHO-teoria) ei pidä paikkansa, vaan 9 - 14-akseliset yhdistelmät aiheuttavat enemmän urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät, kun sama massa kuormittaa rakennetta samassa ajassa, ja pohjamaana on
  - turve tai erityisen pehmeä savi maan ollessa sulana tai
  - siltti tai hieno hiekka roudan sulamisen aikana
- B. Kantavilla pohjamailla sijaitsevilla päällystetyillä teillä sekä paksupäällysteisillä teillä, joiden päällysteen paksuus on yli 200 mm, AASHO-teoria pitäneen paikkansa, joten 9...14-akseliset yhdistelmät eivät todennäköisesti aiheuta sen enempää urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät, kun kuljetettava massa on saman suuruinen.



## Lähteet

Haakana V., Kalliainen, A., Kolisoja, P. 2015. Raskaista ajoneuvoista tierumpuihin kohdistuvat rasitukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2015. 72 s. + 1 liite. Saatavilla 5.2.2018

[https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts\\_2015-18\\_raskaista\\_ajoneuvoista\\_web.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-18_raskaista_ajoneuvoista_web.pdf)

Ilmatieteenlaitos. 2019. Havaintojen lataus -internetsivu. Saatavilla <https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!>. Tiedot haettu 15.1.2019 havaintoasemilta Ranuan lentokenttä, Pudasjärvi Sarakylä, Alajärvi Möksy ja Multia Karhila.

Kalliainen A., Haakana, V., Korhonen M., Mäkinen J., Kolisoja P. 2016. Teräsrumpujen uudet korjausmenetelmät. Halkaistu sisäputki, puolipohjaus ja pohjan betonointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 26/2016. 70 s. + 1 liite. Saatavilla 5.2.2018

[https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts\\_2016-26\\_terasrumpujen\\_uudet\\_web.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2016-26_terasrumpujen_uudet_web.pdf)

Kolisoja, P., Kalliainen, A. & Haakana, V. 2015. Effect of Tire Configuration on the Performance of a Low-Volume Road Exposed to Heavy Axle Loads: Response Measurements. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2474, s. 166-173.

Vuorimies, N., Kalliainen, A., Rossi, J., Kurki, A., Kolisoja, P., Varin, P. & Saarenketo, T. 2018. Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015–2017. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 63/2018. 115 s ja 4 liites.

[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2018-63\\_tierakenteen\\_rasittuminen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-63_tierakenteen_rasittuminen_web.pdf)

# Kuormitusajoneuvojen tiedot

## Simo 5.–7.6.2018

Simo 5.6.2018 parittomat ylitykset				26 tn+38 tn = 64 tn			
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	9	9	9	9	10	10
Akseliväli (m)	4,7	1,4	5,05	1,4	5,2	1,85	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Simo 5.6.2018 parilliset ylitykset				26 tn+38 tn = 64 tn			
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	9	9	9	9	10	10
Akseliväli (m)	4,7	1,4	5,4	1,4	5,25	1,85	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R19,5	275/70R19,5	275/70R19,5	275/70R19,5

\*akselimassat arvioitu

Simo 6.6.2018 1. rekka				26 tn+38 tn = 64 tn			
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	9	9	9	9	10	10
Akseliväli (m)	4,7	1,4	5,05	1,4	5,2	1,85	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Simo 6.6.2018 2. rekka				28 tn+34 tn = 62 tn				YHTEENSÄ 126 tn	
Akseli	8	9	10	11	12	13	14		
Akselimassa (t)*	8	10	10	8	8	9	9		
Akseliväli (m)	4,65	1,3	3,9	1,35	3,85	1,8			
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari		
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5		

\*akselimassat arvioitu

Simo 7.6.2018 parittomat ylitykset				26 tn+38 tn = 64 tn			
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	9	9	9	9	10	10
Akseliväli (m)	4,7	1,4	5,05	1,4	5,2	1,85	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Simo 7.6.2018 parilliset ylitykset				28 tn+34 tn = 62 tn			
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	8	8	9	9
Akseliväli (m)	4,65	1,3	3,9	1,35	3,85	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5

\*akselimassat arvioitu

**Kyyjärvi 22.–24.5.2018**

Kyyjärvi 22.5.2018

28 tn+36 tn = 64 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	9	9	9	9
Akseliväli (m)	4,6	1,4	5,2	1,36	4,91	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Kyyjärvi 23.5.2018

1. rekka

28 tn+36 tn = 64 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	9	9	9	9
Akseliväli (m)	4,6	1,4	5,2	1,36	4,91	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Kyyjärvi 23.5.2018

2. rekka

32,5 tn+31,5 tn = 64 tn

Yhteensä 125 tn

Akseli	8	9	10	11	12	13	14
Akselimassa (t)*	7,5	6,5	9,25	9,25	11	10,25	10,25
Akseliväli (m)	3,3	1,4	1,4	1,4	4,4	3,9	1,85
Rengastyyppi	single	single	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	315/80R22,5	315/80R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5

\*akselimassat arvioitu

Kyyjärvi 24.5.2018

26,5 tn + 38,6 tn = 65,1 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7	8
Akselimassa (t)*	7,5	10	9	8,4	8,8	5	4,3	4,5
<b>Sisäpyörien massa (t)**</b>							<b>3,8</b>	<b>3,8</b>
Akseliväli (m)	4,63	1,4	5,45	1,4	4,95	1,43	1,35	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

\*\*asetetus 4 ylityksille 1-10, ylityksillä 11-16 vaihdeltu asetusta 5, 6 ja 3

**Kyyjärvi 23. - 24.10.2018**

Kyyjärvi 23.10.2018 aamupäivä 1. rekka 28 tn+36,5 tn = 64,5 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	9	9	9,25	9,25
Akseliväli (m)	4,6	1,35	5,1	1,35	5,2	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Kyyjärvi 23.10.2018 aamupäivä 2. rekka 24 tn+36 tn = 60 tn Yhteensä 124,5 tonnia

Akseli	8	9	10	11	12	13	14
Akselimassa (t)*	7,5	8,25	8,25	9	9	9	9
Akseliväli (m)	4,7	1,35	5,4	1,3	5,1	2,05	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Kyyjärvi 23.10.2018 iltapäivä 24 tn+36 tn = 60 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	7,5	8,25	8,25	9	9	9	9
Akseliväli (m)	4,7	1,35	5,4	1,3	5,1	2,05	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Kyyjärvi 24.10.2018 aamupäivä 24 tn+36 tn = 60 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	7,5	8,25	8,25	9	9	9	9
Akseliväli (m)	4,7	1,35	5,4	1,3	5,1	2,05	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Kyyjärvi 24.10.2018 iltapäivä 1. rekka 28 tn+36,5 tn = 64,5 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	9	9	9,25	9,25
Akseliväli (m)	4,6	1,35	5,1	1,35	5,2	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Kyyjärvi 24.10.2018 iltapäivä 2. rekka 24 tn+36 tn = 60 tn Yhteensä 124,5 tonnia

Akseli	8	9	10	11	12	13	14
Akselimassa (t)*	7,5	8,25	8,25	9	9	9	9
Akseliväli (m)	4,7	1,35	5,4	1,3	5,1	2,05	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5	265/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

**Ranua 2.–3.10.2018**

Ranua 2.10.2018 aamupäivä

1. rekka

27 tn+36 tn = 63 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	7	10	10	9	9	9	9
Akseliväli (m)	4,55	1,35	5,3	1,3	5,25	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

Ranua 2.10.2018 aamupäivä

2. rekka

28 tn+34 tn = 62 tn

Yhteensä 125 tonnia

Akseli	8	9	10	11	12	13	14
Akselimassa (t)*	9	9,5	9,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Akseliväli (m)	4,65	1,3	3,9	1,35	3,85	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5

\*akselimassat arvioitu

Ranua 2.10.2018 iltapäivä

28 tn+34 tn = 62 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	9	9,5	9,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Akseliväli (m)	4,65	1,3	3,9	1,35	3,85	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5

\*akselimassat arvioitu

Ranua 3.10.2018 aamupäivä

28 tn+34 tn = 62 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	9	9,5	9,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Akseliväli (m)	4,65	1,3	3,9	1,35	3,85	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5

\*akselimassat arvioitu

Ranua 3.10.2018 iltapäivä

1. rekka

28 tn+34 tn = 62 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	9	9,5	9,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Akseliväli (m)	4,65	1,3	3,9	1,35	3,85	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5

\*akselimassat arvioitu

Ranua 3.10.2018 iltapäivä

2. rekka

27 tn+36 tn = 63 tn

Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	7	10	10	9	9	9	9
Akseliväli (m)	4,55	1,35	5,3	1,3	5,25	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	315/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

\*akselimassat arvioitu

# Kyyjärven ja Simon koekohteiden kuormitus suunnitelmat keväällä 2018

## Toteutuneet kuormitusajot Kyyjärvi HCT-mittaus 22.-24.5.2018

- Punainen viiva 0,9 m päällysteen reunasta
- Ajolinjan päällysteen alapinnan pystysiirtymäanturi 1,0 m päällysteen reunasta
- Sivulinjan päällysteen alapinnan pystysiirtymäanturi 1,5 m päällysteen reunasta
- Vihreä viiva 1,55 m päällysteen reunasta

### 22.5.2018 alkoi noin klo 10. Yksi rekka ja ajonopeus noin 50 km/h. Ajot kumpaankin suuntaan.

- 10 kpl ylityksiä kohteelle piirrettyä pitkää ajolinjaa pitkin (viiva jää ohjauspyörän keskelle) 20 minuutin välein. Viivan väri punainen
- tauko 1,5-2 tuntia
- 4 kpl ajoja toista piirrettyä viivaa pitkin (60 cm kauempana tien reunasta) 20 minuutin välein. Viivan väri vihreä
- 2 kpl ajoja "vapaa valinteisia linjoja" 20 minuutin välein. Ajot olivat punaisesta viivasta tien reunaa kohti

### 23.5.2018 alkoi noin klo 9. Kaksi rekkaa peräkkäin ja ajonopeus noin 50 km/h. Ajot kumpaankin suuntaan.

- 5 kpl kahden rekan ylityksiä kohteelle piirrettyä pitkää ajolinjaa pitkin (viiva jää ohjauspyörän keskelle) 20 minuutin välein. Viivan väri punainen
- tauko 1,5-2 tuntia
- 2 kpl ylityksiä toista piirrettyä viivaa pitkin (60 cm kauempana tien reunasta)"40 minuutin välein" Viivan väri vihreä
- 1 kpl ylityksiä "vapaa valinteista linjaa" pitkin 40 minuutin välein.

### 24.5.2018 alkoi noin klo 8:30. Yksi rekka AT Wheelsin kärryllä ja ajonopeus noin 50 km/h. Ajot kumpaankin suuntaan

- 10 kpl ylityksiä kohteelle piirrettyä pitkää ajolinjaa pitkin (viiva jää ohjauspyörän keskelle) 20 minuutin välein. Viivan väri punainen
- tauko 1,5-2 tuntia
- 6 kpl ajoja kohteelle piirrettyä pitkää ajolinjaa pitkin (viiva jää ohjauspyörän keskelle) 20 minuutin välein. Viivan väri punainen. Peräkärryn sisäakseleiden akselipainoasetukset olivat:
  - 4 (ajot 1-10)
  - 5 (ajot 11-12)
  - 6 (ajot 13-14)
  - 3 (ajot 15-16)

### Toteutuneet kuormitusajot Simo HCT-mittaus 5.-7.6.2018

- Punainen viiva 0,9 m päällysteen reunasta
- Vihreä viiva 1,7 m päällysteen reunasta (linja 2)
- Oranssi viiva 0,5 m päällysteen reunasta (ulkolinja)
- Punaisen ja vihreän viivan keskikohdasta (Musta linja eli linja 1)
- Ajolinjan päällysteen alapinnan pystysiirtymäanturi 1,0 m päällysteen reunasta
- Sivulinjan päällysteen alapinnan pystysiirtymäanturi 1,5 m päällysteen reunasta

#### ti 5.6.2018 alkaa noin klo 10:30. Rekka noin 20 min välein ja ajonopeus noin 50 km/h

- 10 kpl ylityksiä kohteelle piirrettyä punaista pitkää ajolinjaa pitkin (viiva jää ohjauspyörän keskelle)
- tauko 1,5-2 tuntia
- 4 kpl ajoja punaista viivaa pitkin 20 minuutin välein.

#### ke 6.6.2018 alkaa noin klo 9. Kaksi rekkaa peräkkäin noin 40 min välein ja ajonopeus noin 50 km/h

- 5 kpl kahden rekan ylityksiä kohteelle piirrettyä punaista pitkää ajolinjaa pitkin (viiva jää ohjauspyörän keskelle) 40 minuutin välein.
- tauko noin 2 tuntia
- 2 kpl kahden rekan ylityksiä punaista viivaa pitkin 40 minuutin välein.

#### to 7.6.2018 alkaa noin klo 9. Rekkaa noin 20 min välein ja ajonopeus noin 50 km/h

- o yhden rekan ylityksiä seuraavilla ajolinjoilla 20 minuutin välein.
  1. punainen viiva (1 kpl)
  2. linja 1 (1 kpl) punaisen ja vihreän viivan keskikohdasta
  3. ulkolinja (1 kpl) oranssi
  4. linja 2 (1 kpl) vihreä väri
  5. punainen viiva (1 kpl)
  6. punainen viiva (1 kpl)
  7. linja 1 (1 kpl) punaisen ja vihreän viivan keskikohdasta
  8. linja 1 (1 kpl) punaisen ja vihreän viivan keskikohdasta
  9. ulkolinja (1 kpl) oranssi
  10. ulkolinja (1 kpl) oranssi
  11. linja 2 (1 kpl) vihreä väri
  12. linja 2 (1 kpl) vihreä väri
- o tauko 1,5-2 tuntia
- o yhden rekan ylityksiä seuraavilla ajolinjoilla 20 minuutin välein.
  13. ulkolinja (1 kpl) oranssi
  14. punainen viiva (1 kpl)
  15. linja 1 (1 kpl) punaisen ja vihreän viivan keskikohdasta
  16. linja 2 (1 kpl) vihreä väri



## Mittauksissa käytettyjen antureiden sijainnit

Kyyjärvi	Keskinäinen sijainti tien suunnassa (m)	Syvyys asfaltin pinnasta (m)	Sijainti ajourasta tien reunaa kohti (m)
Ajouralinjan siirtymäanturi	0	0,03	0 (ajourassa)
Sivulinjan siirtymäanturi	-0,21	0,03	-0,5
Kiihtyvyyssanturit	1,04	0	0,25 m välein -1,5 - +0,75 m

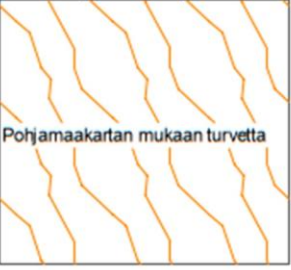
Simo	Keskinäinen sijainti tien suunnassa (m)	Syvyys asfaltin pinnasta (m)	Sijainti ajourasta tien reunaa kohti (m)
Ajouralinjan siirtymäanturi*	-0,5	0,03	0
Sivulinjan siirtymäanturi	-0,72	0,05	-0,5
HVP 1	-1,5	1,53	0,16
HVP 2	-2,2	1,95	0,38
TTY (Dielektrisyys) Perco	?	0,25	0
TTY (Dielektrisyys) Perco	?	0,35	0
TTY (Dielektrisyys) Perco	?	0,65	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	0,15	0
Kiihtyvyyssanturit	0,5	0,02	0,25 m välein -2 - +0,75 m


Tien suunnassa etäisyys suhteessa Percoasemaan

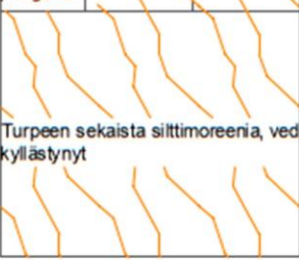
\*) mittausalueensa reunassa, ei lineaarisella alueella

Ranua	Keskinäinen sijainti tien suunnassa (m)	Syvyys kulutuskerroksen pinnasta (m)	Sijainti ajourasta tien reunaa kohti (m)
Perco (käytetty mittauksissa)	?	0,15	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	0,5	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	0,8	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	1,1	0

## Koekohteilla teiden poikkileikkaukset

Kyyjärvi		
	Mittaus- pisteellä	Ympäristössä
Asfaltti	30-40	30-50
Kantava	150	150
Jakava	80	40-150
Muut rakenne- kerrokset	300	150-350
 <p>Pohjamaakartan mukaan turvetta</p>		

Simo		
	Mittaus- pisteellä	Ympäristössä
Asfaltti	110	90-130
Kantava	200	150-250
Suodatin	300	250-500
 <p>Hiekka</p>		

Ranua (soratie)		
	Mittaus- pisteellä	Ympäristössä
Kulutusk.	100	60-110
Kantava	100	70-130
Vanha kantava/ jakava	200	100-300
Käsiteltyä pohjamaata/ pengertä	250	Ei tietoa
 <p>Turpeen sekaista siittimoreenia, vedellä kyllästynyt</p>		





ISSN 2490-0982  
ISBN 978-952-317-735-2  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)